

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO

JOÃO VITOR SICARI MARTINS

QUALIDADE FÍSICA, QUÍMICA E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO EM ÁREAS
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO NO CERRADO

UBERABA/MG

2024

João Vitor Sicari Martins

Qualidade física, química e estoque de carbono do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres.

Uberaba/MG

2024

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

M343q Martins, João Vítor Sicari
Qualidade física, química e estoque de carbono do solo em áreas sob
diferentes sistemas de manejo no cerrado / João Vítor Sicari Martins. --
2024.
68 f. : il., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) --
Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021
Orientador: Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres

1. Agrossilvicultura. 2. Cana-de-açúcar. 3. Pastagens. 4. Ciência do
solo. 5. Solos – Manejo. I. Torres, José Luiz Rodrigues. II. Universidade
Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 630*114:631.4

Leila Aparecida Anastácio CRB-6/2513

JOÃO VITOR SICARI MARTINS

Qualidade física, química e do estoque de carbono do solo em áreas sob diferentes sistemas de manejo no cerrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Uberaba, 24 de julho de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres - Orientador

Instituto Federal do Triângulo Mineiro *Campus* Uberaba - IFTM / Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

Prof. Dr. Valdeci Orioli Júnior - Membro Titular

Instituto Federal do Triângulo Mineiro *Campus* Uberaba - IFTM

Prof. Dr. Daniel Pena Pereira - Membro Titular

Instituto Federal do Triângulo Mineiro *Campus* Uberaba - IFTM



Documento assinado eletronicamente por **José Luiz Rodrigues Torres**, **Usuário Externo**, em 26/07/2024, às 09:53, conforme horário oficial de

Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Pena Pereira, Usuário Externo**, em 30/07/2024, às 09:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valdeci Orioli Júnior, Usuário Externo**, em 30/07/2024, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1270332** e o código CRC **B527FFE0**.

*Dedico esta dissertação à minha avó
(Maria de Lourdes), que sempre me
incentivou a ir atrás do que eu sonhava.*

AGRADECIMENTOS

Em especial aos meus pais, Edson Sergio e Carmen Lúcia por me proporcionarem a oportunidade de focar inteiramente nos estudos, durante a graduação e parte da pós-graduação.

À minha avó Maria de Lourdes por sempre acreditar que eu era capaz de realizar o que desejava e sonhava.

Às minhas irmãs, Ana Clara, que me influenciou a seguir o caminho que agora sigo e, Maria Giovana, por ter me abrigado em sua casa durante a fase final da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luiz Rodrigues Torres, por ter me aceito como seu orientando e aluno, pela paciência, por ter confiado em meu trabalho, participado ativamente das atividades de campo e me passado parte de seus conhecimentos.

À minha companheira, Alexandra, por sempre me ouvir, aceitar e me motivar diante dos desafios.

Aos meus amigos de pós-graduação, especialmente ao Álisson, Ricardo e Dayane, que me ajudaram nos processos de coleta de amostras. Vocês foram importantíssimos para que tudo isso fosse possível.

À Universidade Federal do Triângulo Mineiro e ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental pela oportunidade de formação acadêmica, à FAPEMIG pelo amparo financeiro que, sem ele, não teria sido possível.

Ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro que, por meio do meu orientador, disponibilizou a infraestrutura do Laboratório de Física do Solo e material necessário para que as análises físicas fossem realizadas.

A TODOS, MEU MUITO OBRIGADO!

RESUMO

Os sistemas de manejo utilizados afetam significativamente os atributos do solo nas áreas inseridas no processo produtivo do cerrado brasileiro, que de forma geral causam algum tipo de deterioração da qualidade do solo. Neste estudo objetivou-se quantificar e qualificar os atributos físicos, químicos e o estoque de carbono do solo das áreas sob diferentes usos. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, onde foram avaliadas quatro áreas com diferentes manejos: Sistema agroflorestal (SAF); Área cultivada com cana-de-açúcar (Cana); Pastagem de braquiária (PA) e; Mata Nativa semidecidual ciliar (MN), com cinco repetições. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas do solo durante o período chuvoso em quatro profundidades, de 0,0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m, para avaliação dos atributos químicos, do carbono orgânico total (COT) e seu estoque no solo (EstC) e dos seguintes atributos físicos: Densidade do solo (Ds), macroporosidade, microporosidade, porosidade total e resistência mecânica à penetração das raízes (RP). Foram calculados o diâmetro médio geométrico, diâmetro médio ponderado, índice de estabilidade de agregados (IEA) porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (índice AGRI) e, ainda, calculou-se o índice de sensibilidade (IS) para alguns atributos avaliados. Utilizou-se do software Agroestat para realização da análise de variância e, quando significativos, aplicação do teste F dos dados. Os usos e ocupação do solo alteram os atributos químicos, físicos e o estoque de carbono no solo de forma significativa, independente do tempo de utilização de cada uma delas. A área de MN apresentou os maiores valores dos macronutrientes e micronutrientes avaliados, seguido pela área em SAF, depois pela área com cana e pastagem que apresentaram valores semelhantes entre si. Para a maioria dos atributos físicos, os valores baixos foram quase sempre encontrados na área cultivada com CA, em que por meio da Ds e RP constatou-se que o solo apresentava-se compactado; Os maiores índices de agregação (IEA e índice AGRI) foram observados na área em SAF, seguido pela PA, MN e CA; O IS mostrou que todos os sistemas diminuíram em mais de 60% o teor de COT e o EstC do solo em comparação com a mata nativa. Os maiores valores de EstC foram encontrados na MN em todas as camadas de solo, enquanto que nas áreas de CA, PA e SAF possuem valores iguais até 0,20 m de profundidade.

Palavras-chave: sistema agroflorestal, cana-de-açúcar, pastagem, mata nativa, atributos físicos e químicos.

ABSTRACT

The management systems used significantly affect soil attributes in areas included in the production process of the Brazilian cerrado, which generally cause some type of deterioration in soil quality. This study aimed to quantify and qualify the physical, chemical attributes and soil carbon stock in areas under different uses. The experimental design was completely randomized, where four areas with different management were evaluated: Agroforestry system (SAF); Area cultivated with sugar cane (Cane); Brachiaria pasture (PA) and; Native semi-deciduous riparian forest (MN), with five replications. Deformed and undisturbed soil samples were collected during the rainy season at four depths, from 0.0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.40 m, to evaluate chemical attributes, total organic carbon (TOC) and its stock in the soil (EstC) and the following physical attributes: Soil density (Ds) , macroporosity, microporosity, total porosity and mechanical resistance to root penetration (RP). The geometric mean diameter, weighted mean diameter, aggregate stability index (IEA), percentage of aggregates with a diameter greater than 2 mm (AGRI index) were calculated, and the sensitivity index (SI) was calculated for some attributes evaluated. . The Agroestat software was used to perform the analysis of variance and, when significant, apply the F test to the data. Soil uses and occupation alter the chemical and physical attributes and carbon stock in the soil significantly, regardless of the time of use of each of them. The MN area presented the highest values of the macronutrients and micronutrients evaluated, followed by the area in SAF, then by the area with sugarcane and pasture, which presented similar values to each other. For most physical attributes, low values were almost always found in the area cultivated with CA, where through Ds and RP it was found that the soil was compacted; The highest aggregation indices (IEA and AGRI index) were observed in the SAF area, followed by PA, MN and CA; The IS showed that all systems reduced the TOC content and EstC of the soil by more than 60% compared to native forest. The highest EstC values were found in MN in all soil layers, while in the CA, PA and SAF areas they have equal values up to 0.20 m depth.

Keywords: agroforestry system, sugar cane, pasture, native forest, physical and chemical attributes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variáveis climáticas para o período de outubro de 2023 a junho de 2024, obtidas junto ao Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do INMET (2024).	25
Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo no município de Uberaba, MG, 2024.....	27
Figura 3 - Anel volumétrico de aço sendo cravado a 0,10 m de profundidade para coleta de amostra de solo indeformada, com o trado de Uhland em Uberaba, MG, 2024.	28
Figura 4 - Anéis volumétricos sendo saturados por 24 horas, para depois serem colocados em mesa de tensão a 0,6 m de altura de coluna de água, no Laboratório de Física do Solo do IFTM Campus Uberaba, MG.....	29
Figura 5 - Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de ponteira cônica de 30°, para estimar a resistência a penetração das raízes das plantas no solo.....	30
Figura 6 - Aparelho de Yoder de oscilação vertical para determinação de estabilidade de agregados, com amostras em duplicata em dois jogos de peneiras com malha de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,106 mm.	31
Figura 7 - Resistência mecânica à penetração das raízes no solo avaliada com o penetrômetro de impacto, nas áreas com diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG, 2024.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à penetração das raízes (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv) nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	34
Tabela 2 - Valores de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	39
Tabela 3 - Distribuição dos agregados por classes do diâmetro, nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	41
Tabela 4 - Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA).	44
Tabela 5 - Teores de Matéria Orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), Potássio (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba-MG, 2024.	47
Tabela 6 - Teores de manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	51
Tabela 7 - Densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (EstC) nas diferentes profundidades, nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	54
Tabela 8 - Índice de sensibilidade (Is) calculado para carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (EstC), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.	56

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1. Sistema convencional de plantio e Sistema de plantio direto.....	15
2.2. Sistemas agroflorestais e agroecológicos	17
2.3. Atributos Físicos	19
2.3.1. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	19
2.3.2. Resistência mecânica à penetração das raízes	20
2.3.3. Umidade Volumétrica	21
2.3.4. Agregação do solo.....	22
2.4. Atributos Químicos	23
2.4.1. Carbono orgânico total e seu estoque no solo	24
3. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1. Caracterização da área de estudo	24
3.2. Delineamento Experimental.....	25
3.3. Informações Complementares.....	26
3.4. Atributos físicos	27
3.4.1. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	27
3.4.2. Resistência do solo à penetração.....	29
3.4.3. Conteúdo de água do solo	29
3.4.4. Agregação do solo.....	30
3.4.5. Índice de sensibilidade	32
3.5. Atributos Químicos	32
3.5.1. Coleta e preparo das amostras de solo.....	32
3.5.2. Análise de nutrientes	32
3.5.3. Carbono orgânico total e estoque de carbono	33
3.6. Análise estatística.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Atributos Físicos	33
4.2. Atributos Químicos	46
4.3. Estoque de Carbono	53
4.4. Índice de Sensibilidade.....	55
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

O cerrado brasileiro ocupa uma área de 204 milhões de hectares e, atualmente, é ocupado por atividades agrícolas em quase sua totalidade. Contudo, sabe-se que nas regiões tropicais e, especialmente no cerrado brasileiro, predominam os Latossolos, que, em condições naturais, apresentam limitações de ordem química para a sua utilização (EMBRAPA, 1982) além da forte sazonalidade climática, ocorrendo um período seco que varia entre 5 e 7 meses (maio a outubro) (VILELA *et al.*, 2015).

Esta expansão requer a abertura de novas áreas de cerrado nativo ou utilização daquelas até então relegadas a outras atividades, principalmente em áreas de pastagens degradadas. A exigência de se desenvolver novas tecnologias de manejo ou aperfeiçoar aquelas já existente é o fator chave na obtenção de altos rendimentos de produção no Cerrado brasileiro. Principalmente aquelas práticas de manejo que promovam a melhoria da qualidade do solo mantendo ou aumentando os teores de matéria orgânica ao longo dos vários cultivos sucessivos e que busquem a sustentabilidade agrícola.

Estudo desenvolvido por Corbeels *et al.* (2016) apontaram que a conversão de Cerrado nativo em área de sistema de plantio convencional induziu perdas de 17% nos estoques de carbono (EstC) do solo na profundidade até 0,40 m após 26 anos de cultivo de sucessão soja/milho como culturas solteiras por safra. Em contrapartida, a adoção do sistema de plantio direto (SPD) promoveu a recomposição dos EstC ao nível do Cerrado natural após 11 a 14 anos de cultivo para a mesma profundidade. Mesmo assim, apesar de iguais, os estoques de carbono em SPD não sobrepuseram os observados no Cerrado natural.

Apesar dos avanços obtidos ao longo dos anos em busca da sustentabilidade, em se tratando de técnicas e modelos de produção mais sustentáveis, a fundamentação da agricultura conservacionista sobre a monocultura, ainda que sustentada pelo SPD, torna esse modelo de produção ecologicamente ultrapassado e que precisa avançar tecnologicamente (ALTIERI, 2004).

Neste contexto de evolução dos sistemas de produção, surgiram os sistemas de integração/lavoura/pecuária/floresta, no qual se busca desenvolver atividades produtivas correspondentes à agricultura, pecuária e silvicultura na mesma área (MACEDO, 2009). Os sistemas agroflorestais e agroecológicos, que são baseados na premissa que diferentes culturas vegetais podem coexistir em um mesmo ambiente, possuindo cada uma sua função e, desta forma, se beneficiar mutuamente (ALTIERI; NICHOLLS, 2011). As produções orientadas

por estes conceitos, principalmente nas zonas intertropicais, onde existem os *hot spots* da biodiversidade, são capazes de prestar diferentes tipos de serviços ecossistêmicos ou ambientais, pois produzem alimentos visando o equilíbrio de nutrientes, que influencia o microclima local e resguarda as relações ecológicas locais (WEDLING *et al.*, 2011; ALMEIDA *et al.*, 2014).

Os sistemas agroflorestais (SAF's) guiados pela agroecologia podem ser importantes elementos de um novo paradigma agrícola, pois, a orientação macrocósmica que guia os preceitos agroecológicos fornece novos meios para atingir a sustentabilidade nas zonas rurais através de maior conservação química e física do solo, dos recursos hídricos e da biodiversidade (DUTRA; SOUZA, 2018).

Com essa diversidade de sistemas de manejo que vem sendo utilizadas no cerrado brasileiro, cresce a necessidade de se estabelecer parâmetros qualitativos e quantitativos das condições físicas e químicas do solo, para avaliar a eficiência do manejo de manejo utilizado e sua influência na produção agrícola (ROSSETTI; CENTURION, 2013).

Com relação aos atributos químicos, aqueles sistemas que aportam maiores quantidades de matéria orgânica, são mais eficientes para facilitar o processo de decomposição/mineralização e tendem alterar positivamente a capacidade de troca catiônica, aumentar a complexação elementos tóxicos e disponibilizar mais nutrientes para as culturas cultivadas (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Para avaliar os atributos físicos do solo vários indicadores de mudanças na qualidade podem ser utilizados, principalmente, aqueles que são sensíveis para refletir a influência dos sistemas de manejo e clima numa escala de tempo que permita a verificação de suas alterações (ISLAM; WEIL, 2000). Dentre eles, os que têm sido usados com frequência para aferir os impactos causados pelos sistemas de manejo são: a densidade do solo, agregação, compactação, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, capacidade de retenção de água e estabilidade de agregados (RAMOS *et al.*, 2010; PEZARICO *et al.*, 2013).

A escala temporal na modificação dos atributos, portanto, se comporta como informação importante a respeito da sustentabilidade dos agroecossistemas e impactos na ecologia local. Neste contexto, a hipótese testada neste estudo é que o sistema agroflorestal é aquele que proporciona melhor qualidade física, química e maior EstC no solo, mesmo sendo o que tem menor tempo de adoção na área. Neste estudo objetivou-se quantificar e qualificar os atributos físicos, químicos e o EstC do solo das áreas com diferentes sistemas de manejo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Sistema convencional de plantio e Sistema de plantio direto

Dentre os sistemas de manejos utilizados atualmente, podemos elencar o sistema convencional como o menos ecológico, ou o mais agressivo, considerando a intensa mobilização do solo. Basicamente, o plantio sob sistema convencional consiste em preparo primário e secundário do terreno (DENARDIN *et al.*, 2012).

Na primeira etapa ocorrem as operações mais grosseiras, como supressão de vegetação invasora, aração e gradagem pesada, que visa induzir os processos bioquímicos de oxidação descompactar o solo, caso necessário, e tornar sua estrutura mais receptiva para as raízes, facilitando a infiltração da água e trocas gasosas em curto prazo. Nesse momento também ocorrem incorporação de insumos agrícolas para correção de atributos químicos do solo, como calagem e fertilizantes. A segunda etapa consiste no destorroamento e nivelamento da porção de terra que passou pelo preparo inicial.

Por outro lado, PD e o SPD, conforme elucidado por Denardin *et al.* (2012), seguem diretrizes mais ecológicas e menos agressivas para o solo. Ainda que o PD proporcione benefícios em questão de estrutura e fertilidade, o SPD é ainda mais benéfico e abrangente, principalmente nas regiões intertropicais.

Tal benefício é também verificado pelos autores Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998). Este estudo revelou que o sistema de plantio direto, principalmente na camada de 0 – 10 cm apresentou superioridade significativa de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em relação ao plantio convencional (PC).

Avaliando formas de carbono (C) e m Latossolo Vermelho Eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado, Rosa *et al.* (2003) afirmaram que o PD não foi eficiente em restaurar os níveis de matéria orgânica no solo e que causou o aumento da densidade e conseqüentemente a compactação do solo. Bertol *et al.* (2004) mostraram que o preparo convencional implica em maior degradação do solo do que sistema de semeadura direta.

Os autores Duarte Júnior e Coelho (2008), os quais analisaram a cultura da cana-de-açúcar em PC (com e sem adubação) e SPD, mostram que manejo convencional é inferior em produtividade quando comparado a SPD sobre leguminosas. Também é evidenciado que no PC existe uma maior degradação do solo, por meio de processos erosivos e lixiviação de nutrientes para as lavouras.

Quantificando o estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil, Costa, Bayer e Mielniczuk (2008) demonstraram que o plantio direto promove acréscimo de carbono (C) no solo quando associado com culturas ricas em C e nitrogênio (N), o que não foi constatado para o plantio convencional. Foi elucidado por Silva Neto *et al.* (2008) que em uma área com Latossolo Vermelho localizada em região subtropical do país sob plantio direto foi registrado aumento no teor de carbono orgânico total.

A presença de C no solo influencia diretamente para a ocorrência de macroagregados, pois interfere na atividade microbológica. Fato que é salientado por Vezzani e Mielniczuk (2011) ao compararem a agregação do solo e estoque de C em Argissolo sob diferentes manejos

Ao avaliarem qualidade do solo através de atributos físicos e químicos em certa microbacia no Distrito Federal, os autores Lago, Lacerda e Neumann (2012) elucidam que densidade do solo e teores de matéria orgânica foram os mais alterados pelo efeito dos manejos. Ressaltam ainda que sob plantio direto, o solo tende a apresentar valores maiores de densidade nas primeiras camadas.

Cury, De Maria e Bolonhezi (2014) demonstraram que PC e PD pouco se diferem em questão do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar, entretanto, foi observado maior fertilidade no PD em comparação ao PC, isso nos leva a crer que ao serem analisados tais sistemas de manejo, o PC pode ser considerado como o menos benéfico para os agricultores.

Ao avaliar os atributos físicos de um Latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura em semeadura direta, Torres *et al.* (2015) observaram que após 12 anos de implantação do sistema, houve melhoria nos atributos físicos (Ds, Ma, Mi, PT) e nos índices de agregação avaliados (DMG, DMP, IEA, AGRI).

Resultados semelhantes foram obtidos por Melo *et al.* (2016), ao quantificarem os estoques e frações de matéria orgânica do solo (MOS) sob SPD e PC em Latossolo Vermelho, esclarecem que, mesmo em fase inicial de implementação, o sistema de plantio direto apresenta balanço positivo de carbono comparado ao plantio convencional e pastagem, devido ao maior aporte de matéria orgânica no solo.

Segundo Klug *et al.* (2020), os ecossistemas em equilíbrio ou mais próximos do equilíbrio, apresentam melhores qualidades químicas quando comparados a plantios florestais de eucalipto e pinus sob SPD.

2.2. Sistemas agroflorestais e agroecológicos

Inegavelmente o PD e SPD possibilitaram uma melhor gestão e uso do solo destinado à produção agrícola no Brasil. Entretanto, há propostas de manejos que podem superá-los, principalmente tendo em vista a sustentabilidade. Essas estratégias são fruto do avanço teórico-metodológico da Agroecologia e da disseminação de experiências com SAFs.

A agroecologia é uma ciência ainda nova e suas formulações se iniciaram em resposta ao pacote tecnológico da Revolução Verde. Por isso, durante muito tempo várias pessoas a tem compreendido de forma equivocada e assim transmitindo, como se fosse uma alternativa de produção mais sustentável, ou ainda um estilo de vida mais saudável. Altieri (1987) define um agroecossistema, com base na agroecologia, como um sistema agrícola onde há interações ecológicas entre os diferentes fatores químicos, biológicos e físicos.

Segundo Caporal e Costabeber (2004), a agroecologia é uma ciência multidisciplinar, que tem como unidade de estudo o agroecossistema, que tem como enfoque científico de sustentar uma transição para agriculturas mais ecológicas e desenvolvimento rural sustentável.

Ao analisarem e compararem atributos físicos do solo em sistemas agroflorestais e sistemas convencionais de plantio, Carvalho, Goedert e Armando (2004) obtiveram melhores resultados nas agroflorestas em todos atributos avaliados: densidade (25% menor que plantio convencional), maior quantidade de macroporos, resistência à penetração (cerca de 40% menor) e estabilidade de agregados, quando comparado a um sistema convencional.

Foi evidenciado por Barreto *et al.* (2006) que um sistema agroflorestal no sul da Bahia caracterizado pelo plantio de cacau apresentou maior fertilidade do solo quando comparado a uma pastagem. Esses autores ainda demonstram que não houve alteração nos conteúdos de carbono orgânico e nitrogênio a partir dos diferentes usos.

Em seu estudo, Costa, Bayer e Mielniczuk (2008) demonstraram que sistemas de manejo que tem grande adição de resíduos vegetais no solo afetam positivamente o balanço de C do solo, o que leva a crer que o agroecossistema modelado pelo paradigma agroecológico pode funcionar como um canal de absorção e armazenamento de carbono atmosférico.

Ao avaliar a distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos, Loss *et al.* (2009b) concluíram que o manejo de base agroecológica foi mais eficiente para formação e estabilização dos agregados quando comparado a outros modelos de produção agrícola. Dando continuidade nos estudos, Loss *et al.* (2009c) avaliaram os atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção

agroecológica, revelaram que o teor de bases trocáveis e carbono orgânico total (COT) em sistema agroflorestal, com apenas um ano de implementação é maior que em pastagem.

Segundo Nair *et al.* (2009), as agroflorestas tem imenso potencial para sequestro de carbono atmosférico, o que revela seu papel estratégico para atingir a sustentabilidade agrícola. Esse potencial dos SAFs em sequestrar carbono também é reportado pelos autores Froufe, Rachwal e Seoane (2011), enquanto que Iwata *et al.* (2012) observaram aumento na qualidade química do solo através do manejo agroflorestal.

Os autores Altieri e Nicholls (2011) ressaltam que uma das maiores vantagens dos sistemas agroflorestais possuem uma ótima capacidade para ciclar os nutrientes, o que reduz o custo para o agricultor. Nas agroflorestas, tal fato ocorre principalmente pelo intenso aporte de matéria orgânica no sistema, o que aumenta a atividade de organismos e diversifica a cadeia trófica em nível de solo. A implementação de sistemas agroflorestais consorciados com pastagens (agrosilvipastoril) também tem implicações na qualidade física do solo (WEDLING *et al.*, 2011).

Ao quantificar o carbono orgânico total e agregação do solo em Sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola, Loss *et al.* (2015) apontam que a manutenção de restos culturais e diversidade destes resíduos orgânicos é fundamental para aumentar os teores de COT, além disso, também foi mostrado que após cinco anos de transição do PC para SPD de base agroecológica, o DMG dos agregados aumentou.

Dentre as possíveis estratégias produtivas orientadas pela Agroecologia, existem os sistemas menos complexos, com baixo estrato vegetal e consórcios simples de hortaliças. Há também os agroflorestais, nos quais o foco é uma produção agrícola que simule a vegetação natural, em busca de serviços ecossistêmicos (VASCONCELLOS; BELTRÃO, 2018).

O manejo adotado em sistemas agroflorestais no Cerrado contribuiu para melhoria de atributos químicos, assim como contribuiu para manutenção dos valores de densidade próximos aos observados em solo sob vegetação nativa (RIBEIRO *et al.*, 2019). Barbosa *et al.* (2020) também observaram tais benefícios do manejo agroecológico ao comparar densidade, porosidade total, umidade e porosidade de aeração com PC. Os resultados revelam que as médias dos atributos em questão sob manejo agroecológico se aproximam dos mesmos atributos em mata nativa.

As melhorias promovidas na estrutura do solo pela adoção do manejo de base agroecológica também foram reportadas pelos autores Zhan *et al.* (2023), que em seu estudo

concluíram que plantios agroflorestais de bases ecológicas aumentaram os agregados em relação ao plantio monocultural.

Portanto, a literatura indica que os sistemas agroflorestais são eficientes em melhorar a estrutura física do solo, nesse sentido, é válido afirmar que os indicadores de agregação são os mais modificados após implantação de manejo de bases agroecológicas.

O mesmo vale para teores e quantidade de carbono orgânico e matéria orgânica no solo. No geral, os trabalhos publicados anteriormente a essa pesquisa também revelam o potencial do SAF's em aumentar fertilidade do solo. Entretanto, essa afirmação ainda carece de mais investigações.

2.3. Atributos Físicos

Os atributos físicos são indicadores bastante sensíveis em relação às mudanças no uso do solo. Estudos anteriores indicaram que os atributos de natureza física foram o que melhor demonstraram diferenças de qualidade quando comparadas diferentes áreas. Essas alterações podem ser suficientes para influenciar atributos químicos e biológicos (ARAÚJO, *et al.*, 2007)

Em casos onde notavelmente há degradação física, pode-se notar a perda da capacidade de determinado solo em cumprir certas funções, principalmente em relação aos processos hidrológicos. O agravamento de processos erosivos através de aumento do escoamento superficial é um exemplo (BERTOL *et al.*, 2004).

Os atributos físicos mais analisados pela literatura são resistência mecânica à penetração das raízes (RP), densidade do solo (TORRES *et al.*, 2011), porosidade e índices de agregação: DMG (LOSS *et al.*, 2015); DMP (WEDLING *et al.*, 2005); IEA (FONTANA *et al.*, 2010) e Índice AGRI (TORRES *et al.*, 2015). A variação desses índices sob efeito dos diferentes manejos pode ser medida através do índice de sensibilidade, que permite inferir se há degradação ou melhoria no indicador físico avaliado (BOLINDER *et al.*, 1999).

2.3.1. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

A densidade (D_s) do solo é indicador importantíssimo para avaliar a qualidade do solo. Um solo com alta densidade não é ambiente favorável para o crescimento da maioria das culturas. Sendo assim, é um atributo que possui correlação positiva com outros atributos

(TORRES *et al.*, 2015), mas principalmente com as porosidades (BEUTLER; CENTURION; ROQUE, 2004).

A atribuição de um valor crítico universal ao crescimento de sistemas radiculares foi objeto de estudo conduzido por diferentes autores. Entretanto, não há uma definição exata desse valor limitante que seja válido para todos os tipos de solo. Os autores Silva e Rosolem (2001) definem um valor crítico de $1,60 \text{ kg dm}^{-3}$ em solos arenosos, enquanto que para solos com teores de argila variando entre 200 a 550 g kg^{-1} , é concluído pelos autores Reinert *et al.* (2008) que entre $1,75$ e $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$ ocorrem restrições ao desenvolvimento radicular.

Importante destacar que a densidade do solo não se relaciona somente com atributos físicos do solo. Os autores Ribeiro *et al.* (2019) destacam que em agroecossistemas onde o aporte de resíduos orgânicos é alto, os valores de densidade tendem a serem próximos de valores observados em zonas com vegetação nativa.

Como consequência do aumento da densidade, é observado o aumento da microporosidade (Mi) e diminuição da macroporosidade (Ma), sendo que isto é ainda mais exacerbado em áreas com plantio direto e utilização de máquinas agrícolas, pois a pressão mecânica com o passar do tempo provoca rearranjo nas partículas do solo (BEUTLER, CENTURION; ROQUE, 2004).

A avaliação da porosidade do solo, portanto, também é bastante relevante para se analisar a estrutura do solo, pois informam a quantidade e qualidade de partes dentro de determinado volume de solo que são ocupadas por gases e soluções (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007). Autores como Taylor e Aschroft (1972) apontaram que a relação Ma/PT deve ser igual ou superior ao valor de 0,33, ou seja, 33% de macroporos. Abaixo dessa faixa é considerado que se trata de um solo com certas restrições para o desenvolvimento radicular e produtividade (BERTOL *et al.*, 2004).

2.3.2. Resistência mecânica à penetração das raízes

O grau de compactação de determinado solo é determinado pela avaliação de diferentes atributos físicos e suas correlações. Entretanto, dependendo das condições edafoclimáticas, a resistência mecânica à penetração (RP) pode oferecer um rápido diagnóstico do adensamento na área analisada, pois se trata de uma variável diretamente proporcional ao grau de compactação (SUZUKI *et al.*, 2007).

O melhor momento para aferição da resistência do solo à penetração é próximo da capacidade de campo. Os autores Silva *et al.* (2008) estabeleceram valor limite crítico de 2,00

Mpa para os valores de resistência mecânica. Outros autores como Arshad, Lowery e Grossman (1996) e Suzuki *et al.* (2007) definem uma faixa crítica que varia de 2,00 Mpa a 4,00 Mpa.

A determinação da resistência mecânica à penetração das raízes é realizada com o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, conforme descrito por Stolf (1991). O número de impactos é inserido em uma equação descrita por Sene *et al.* (1985), cujos resultados são transformados para unidade MPa (Megapascal) ao se multiplicar por constante determinada por Arshad, Lowery e Grossman (1996).

2.3.3. Umidade Volumétrica

Considerando que o teor de matéria orgânica influencia na densidade, na macroporosidade e porosidade total, influencia também na capacidade de determinada área em conservar umidade. O solo enquanto reservatório de água é um requisito importante para desenvolvimento saudável das culturas (CARVALHO; FIGUEIREDO; COSTA, 1999).

As avaliações de umidade do solo, quando associadas a outros atributos podem indicar a condição de determinado solo em cumprir com uma de suas funções essenciais, que é a absorção e armazenamento de águas. Logo, solos sob manejos conservacionistas apresentam maiores capacidades de armazenamento de água, relacionando-se com os teores de matéria orgânica e cobertura vegetal (FIGUEIREDO; DIAS JUNIOR; FERREIRA, 2000).

Em áreas com vegetação nativa o acúmulo de serrapilheira contribui para maior armazenamento de água no solo. Silva *et al.* (2023) demonstraram que existe correlação significativa com o acúmulo de resíduos orgânicos e conteúdo de água no solo em ambientes naturais florestados, destacando a importância da manutenção de resíduos vegetais para atingir boa qualidade no atributo em questão.

Os sistemas de manejo que visam minimizar a exposição do solo à agentes erosivos, como gotas de chuva e ventos, são eficientes em conservar e manejar corretamente os recursos hídricos. Essas valências têm sido notadas no SPD (CARVALHO; FIGUEIREDO; COSTA, 1999) e em sistemas agroflorestais (BARBOSA *et al.*, 2020), em ambos os casos comparados a sistemas convencionais de plantio.

A umidade volumétrica representa o volume de água encontrado em cada amostra de solo. O método para cálculo do atributo em questão é descrito por Teixeira *et al.* (2017). Ávila *et al.* (2011) mostraram que em Latossolos, se trata de um atributo em que é facilmente variado considerando o efeito das estações do ano.

2.3.4. Agregação do solo

A qualidade dos agregados do solo também é sensível às mudanças no uso do solo e diferentes manejos. Isto ocorre devido ao fato de que os índices de agregação possuem correlações com atributos físicos, químicos e biológicos. Entretanto, o que é recorrente na literatura científica é a relação entre matéria orgânica, atividade biológica e agregação do solo (TISDALL; OADES, 1982).

Isso sugere que em áreas onde são adotados sistemas de manejo que não possuem incorporação de matéria orgânica, os agregados tendem a diminuir, aumentando a ocorrência de agregados de menor diâmetro. O mesmo comportamento também pode ser notado em locais com forte presença de maquinário agrícola (SILVA; MIELNICZUCK, 1998).

Pelo contrário, sistemas de manejo com rotação de culturas e adição de resíduos orgânicos no solo tendem a favorecer a agregação do solo. A compreensão dessas melhorias ocorre através do cálculo dos índices de agregação, que podem ainda indicar a resistência de determinada área à erosão (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2011), como é o caso do DMP (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

Outros índices também são importantes indicativos do estado de agregação do solo, como o DMG, que representa o tamanho médio dos agregados (LOSS *et al.*, 2015); IEA, que demonstra a estabilidade dos agregados (FONTANA *et al.*, 2010); e Índice AGRI, indicativo da porcentagem de agregados da amostra retidos na peneira de 2mm (TORRES *et al.*, 2015).

Conforme já citado anteriormente, esses índices são muito influenciados por elementos biológicos, condizente aos autores Wedling *et al.* (2005) ao constatarem correlação positiva entre carbono orgânico total com índices de agregação. Os autores Loss *et al.* (2009b) e Coutinho *et al.* (2010) reforçam que a adição de material orgânico é essencial para a estabilidade dos agregados. Vezzani e Mielniczuck (2011) citam a presença de substâncias oriundas da atividade microbiológica que possuem efeito aglutinador. Já os autores Loss *et al.* (2015) elencam ação dos variados sistemas radiculares que liberam exsudatos e, desta forma, são preponderantes para a qualidade dos agregados.

Para parâmetros de análise desses agregados, considera-se que agregados iguais ou maiores que 0,25mm são macroagregados, enquanto que abaixo desse valor de referência são os microagregados. A formação de microagregados é função da interação de moléculas orgânicas, cátions e óxidos de ferro (VEZZANI; MIELICZUK, 2011) enquanto que a formação de macroagregados se dá pela relação entre diferentes sistemas radiculares com

hifas de fungos, agentes decompositores e diferentes frações da matéria orgânica (LOSS *et al.* 2009b; 2015).

2.4. Atributos Químicos

O avanço técnico-científico no campo da produção agrícola possibilitou o cultivo em solos considerados pobres em nutrientes. Todavia, ainda que atualmente seja possível a fertilização para corrigir certa deficiência, os atributos químicos também podem indicar a qualidade do solo, considerando que, assim como os atributos físicos, também são afetados com o tipo de uso do solo na área (ARAÚJO; GOEDERT; LACERDA, 2007).

Os autores Lago, Lacerda e Neumann (2012) apontaram que a sensibilidade de alguns atributos químicos, como a CTC, são menos sensíveis em relação às mudanças no uso do solo, assim como os autores Cunha *et al.* (2012). Os primeiros também destacaram que acontece o oposto para a matéria orgânica, sendo fortemente influenciada pelo manejo adotado na área.

Dentre os atributos químicos, destacam-se os macronutrientes; fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg); e alguns indicadores: como pH, CTC. Esses atributos compreendidos de maneira conjunta demonstram a fertilidade do solo (LOSS *et al.*, 2009a). O estoque de carbono, COT e MOS também vem sendo estudados constantemente por diferentes autores, pois se tratam de atributos que podem indicar diretamente a sustentabilidade dos agroecossistemas (COSTA; BAYER; MIELNICZUK, 2008; IWATA *et al.*, 2012; LOSS *et al.*, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2019).

A dinâmica de nutrientes secundários como Fe e Zn também são importantes para atingir melhores resultados, desta forma, são detalhadas por Barbosa Filho, Dynia e Fageria (1994). Além disso, solos do cerrado, por serem bastante intemperizados, podem apresentar deficiência de boro (MATIELLO *et al.*, 2009) e cobre (WASTOWSKI *et al.*, 2010).

Sendo assim, a determinação dos teores de diferentes nutrientes do solo é um importante indicador da sua qualidade e ferramenta para desenvolvimento agrícola, além de possibilitar avaliar a influência da cobertura vegetal do solo (KLUG *et al.*, 2020). Os limites e quantidades recomendadas de cada um dos nutrientes nos solos de Minas Gerais são indicados por Alvarez *et al.* (1999).

2.4.1. Carbono orgânico total e seu estoque no solo

As mudanças climáticas e suas consequências já podem ser sentidas em diferentes porções do planeta. Tendo isso em vista é importante remodelar certas estruturas produtivas com a finalidade de se atingir maior sustentabilidade. A agricultura está inserida nesse contexto, pois, dependendo do manejo adotado, os solos agrícolas podem funcionar como sequestradores de carbono atmosférico. Portanto, a avaliação da quantidade de carbono estocado no solo em determinada área pode indicar a sustentabilidade do agroecossistema (BAYER *et al.*, 2006).

As práticas conservacionistas, ou seja, sistemas de manejo que não visam o revolvimento do solo e adotam rotação de culturas com cultivo de plantas de cobertura entre safras, como SPD e PD, se demonstram mais eficientes em capturar carbono atmosférico e propiciar aumento deste no solo (COSTA *et al.*, 2008; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). Isto pode ser refletido na qualidade estrutural do solo. Segundo os autores Wedling *et al.* (2005), a correlação entre COT e IEA é alta.

Também são recorrentes na literatura registros de melhoria no estoque e teor de carbono em sistemas com base no paradigma agroecológico, em especial sistemas agroflorestais (LOSS *et al.*, 2009a; 2009b; 2009c; 2015; IWATA *et al.*, 2012; RIBEIRO *et al.*, 2016). Como a incorporação dos resíduos orgânicos oriundos de podas e colheitas é alta nos sistemas agroflorestais, eles possuem alto potencial de capturar carbono atmosférico (MARIN, 2002; NAIR *et al.*, 2009; FROUFE; RACHWAL; SEOANE, 2011).

Dito isso, a consideração do COT e estoque de carbono no solo são relevantes ao se comparar áreas com diferentes manejos, por demonstrar se determinado sistema de manejo contribui para aumento de carbono no solo ou se libera carbono para atmosfera. A determinação do COT é feita segundo a metodologia proposta por Yeomans e Bremner (1988), enquanto que a quantidade de carbono estocado é realizada através da metodologia proposta por Fernandes e Fernandes (2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental da Fazenda Recanto, situada na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, com seu acesso entre os municípios de

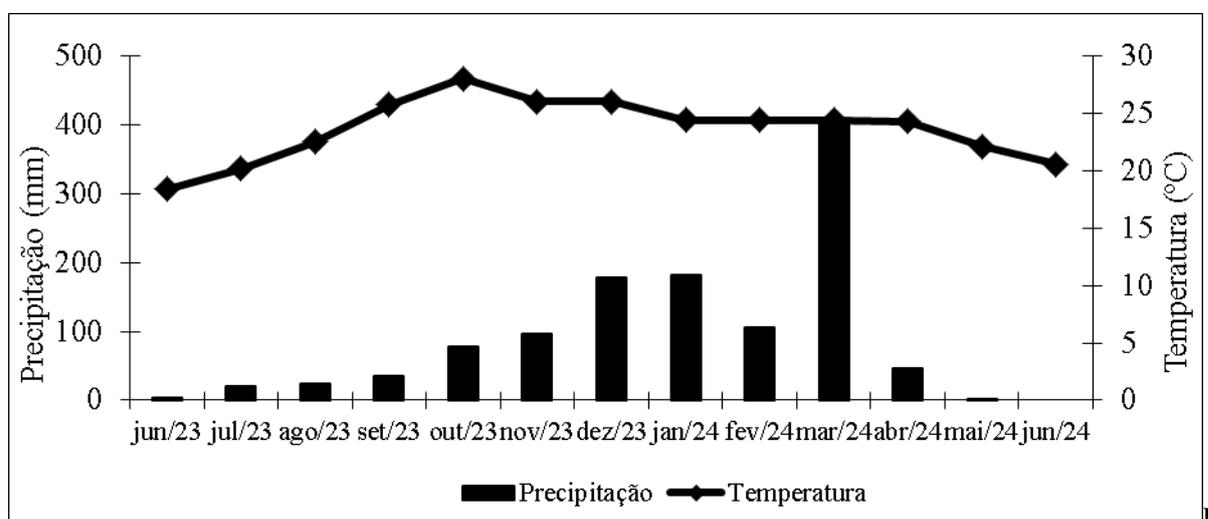
Uberaba e Uberlândia, entre as coordenadas geográficas 19°18'05" de latitude Sul e 48°18'46" de longitude Oeste e a uma altitude de 783 m em relação ao nível do mar. O período de desenvolvimento das atividades ocorreu de outubro de 2023 a janeiro de 2024.

O solo das áreas experimentais: cana-de-açúcar, pastagem e SAF foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (SANTOS *et al.*, 2018), textura média arenosa, que apresentam na camada até 0,30 m a granulometria de 220, 720 e 60 g kg⁻¹ de argila, areia e silte, respectivamente.

O clima da região é classificado como Aw, tropical quente, segundo classificação Koppen atualizada (BECK *et al.*, 2018), com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com médias anuais de precipitação, temperatura e umidade relativa do ar de 1300 mm, 22 °C e 68 %, respectivamente.

No período que foram feitas as amostragens para determinação dos atributos físicos ocorreu à temperatura e precipitação pluviométrica acumulada descrita na Figura 1.

Figura 1 - Variáveis climáticas para o período de outubro de 2023 a junho de 2024, obtidas junto ao Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do INMET (2024).



Fonte: INMET; elaborado pelo autor, 2024.

3.2. Delineamento Experimental

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), onde foram avaliadas quatro áreas conduzidas em diferentes sistemas de manejo, que configuram os tratamentos: 1 – Pastagem de braquiária (*Urochloa brizantha* cv. *Marandu*) há mais de 70 anos; 2 – Cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) há 13 anos; 3 – Sistema agroflorestal (SAF) há

cinco anos; 4 – Mata nativa Semidecidual Ciliar (testemunha), sendo que todas as amostras e análises foram realizadas com cinco repetições, para cada uma das profundidades: 0,00 - 0,10m, 0,10 - 0,20m, 0,20 - 0,30m e 0,30 - 0,40 m.

3.3. Informações Complementares

Segundo o relato da família com a posse da propriedade, a área de pastagem está há mais de 75 anos sob sistema de monocultura, a mesma área já foi utilizada anteriormente para plantio de café.

A área em sistema agroflorestal com cinco anos de manejo possui uma dimensão de 38 m x 25 m, aproximadamente 950 m², sendo que julho/2022 foi aplicado 2,0 t ha⁻¹ de calcário.

O SAF possui onze linhas de canteiros de aproximadamente 17 metros de comprimento com entrelinhas de meio metro de largura cada, sendo que nas linhas de número par são cultivados diferentes tipos de *Citrus*, com espaçamento de 1,5 m entre plantas, intercalados por adubos verdes arbóreos de grande porte como gliricídea (*Gliricidia sepium*) e ingá (*Inga spp*), também com o mesmo espaçamento.

Nos canteiros ímpares são cultivadas algumas variedades de banana (*Musa spp.*) intercaladas com mamão (*Carica papaya*), também com espaçamento de 1,5 m entre plantas. Os demais espaços e estratos florestais são ocupados por plantas de ciclo curto como abóboras (*Curcubita moschata*), jiló (*Solanum aethiopicum*) e adubos verdes de ciclo rápido, como feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e feijão-guandu (*Cajanus cajan*).

Segundo o relato da família que detém a posse do imóvel rural, a cultura da cana-de-açúcar vem sendo cultivada na área desde 2010, sendo que a colheita é feita totalmente mecanizada e todo manejo da cultura (pulverização, adubação) é feita de forma direta sobre os resíduos vegetais da cana depositados na superfície do solo.

À jusante de todas as três áreas se encontra a mata nativa, caracterizada como uma Floresta Estacional Semidecidual Ciliar, que é uma zona de recepção de águas de escoamento superficial e sedimentos trazidos de áreas mais altas da paisagem.

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo no município de Uberaba, MG, 2024.



Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

3.4. Atributos físicos

3.4.1. Densidade, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

Foram coletadas amostras indeformadas com auxílio de um anel volumétrico em anéis de 48 mm de diâmetro por 53 mm de altura, com o trado de Uhland, nas camadas de 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20, 0,20 – 0,30, 0,30 – 0,40 m para determinação da densidade do solo (Figura 3).

Figura 3 - Anel volumétrico de aço sendo cravado a 0,10 m de profundidade para coleta de amostra de solo indeformada, com o trado de Uhland em Uberaba, MG, 2024.



Fonte: do autor, 2024.

Estas amostras indeformadas foram pesadas no Laboratório de Física do IFTM *Campus* Uberaba, depois foram saturadas por 24 horas, pesadas novamente e colocadas na mesa de sucção a 0,60 m de altura de coluna de água para retirada da água dos macroporos (Figura 4) para determinação da macroporosidade (M_a), a seguir pesadas novamente e depois levadas para secar a 105°C por 24 horas, onde por diferença de massa será definida a quantidade de água retida nos microporos, determinando-se a microporosidade, sendo que a

porosidade total será equivalente à diferença de peso entre anéis saturados e secos, dividido pelo volume da amostra (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

A partir da determinação da M_a e a P_T , será determinada a relação M_a/P_T , conforme sugerido por Taylor e Aschcroft (1972), que expressa a faixa limite de macroporos que deve ter o solo, que deve ser igual ou superior a 33%, para não causar restrições para o desenvolvimento radicular e produtividade das plantas.

Figura 4 - Anéis volumétricos sendo saturados por 24 horas, para depois serem colocados em mesa de tensão a 0,6 m de altura de coluna de água, no Laboratório de Física do Solo do IFTM Campus Uberaba, MG.



Fonte: do autor, 2024.

3.4.2. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração das raízes foi determinada por meio do uso de penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de ponteira cônica de 30° (STOLF *et al.*, 1991) (Figura 5). Os dados de campo foram obtidos em números de impactos (dm^{-1}), tendo sido transformados em kgf cm^{-2} por meio da equação $R (\text{kgf cm}^{-2}) = 5,6 + 6,98 N$ (SENE *et al.*, 1985). A seguir, estes valores serão multiplicados pela constante 0,098 para transformação em unidades MPa (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996).

3.4.3. Conteúdo de água do solo

Para avaliação do conteúdo de água no solo, foram realizadas coletas nos mesmos dias das avaliações de resistência do solo à penetração nas profundidades de 0 – 0,10; 0,10 – 0,20; 0,20 – 0,30; 0,30 – 40; 0,40 – 0,50 e 0,50 a 0,60 m, utilizando o trado Holandês, sendo tomadas duas amostras por parcela e homogeneizadas, para obtenção da massa úmida e seca.

As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio, pesadas e colocadas para secar em estufas de circulação forçada de ar a 105 °C por 24 horas.

Figura 5 - Penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de ponteira cônica de 30°, para estimar a resistência a penetração das raízes das plantas no solo.



Fonte: do autor, 2024.

3.4.4. Agregação do solo

Foram coletadas amostras deformadas em cinco diferentes pontos nas profundidades com a cavadeira manual de 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20 - 0,30 e 0,30 - 0,40 m, para avaliação da qualidade e estabilidade dos agregados, que foi avaliada pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), denominado padrão, que consiste em pesar amostras de 50 g de solo, secas ao ar, em duplicata constituída de agregados de diâmetro entre 9,51 a 4,76 mm, os quais serão umedecidos. A seguir as amostras foram transferidas para um jogo de peneiras de 2; 1; 0,5; 0,25 e 0,13 mm de malha, agitando-se em água, com oscilação vertical por 15 minutos (Figura 6).

Figura 6 - Aparelho de Yoder de oscilação vertical para determinação de estabilidade de agregados, com amostras em duplicata em dois jogos de peneiras com malha de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,106 mm.



Fonte: do autor, 2024.

Após a agitação, os conteúdos de cada peneira foram transferidos para recipientes metálicos previamente pesados e submetidos à secagem por 24 horas em estufa a 105 °C, descontado o teor de água em cada peneira.

A partir dos valores de massa dos agregados, foi calculado o diâmetro médio ponderado (DMP) (Equação 1), o diâmetro médio geométrico (DMG) (Equação 2) e o índice de estabilidade de agregados (IEA) (Equação 3).

$$\text{DMP} = \sum (x_i \times w_i) \quad \text{Equação 1}$$

em que x_i é o diâmetro médio das classes (mm); e w_i , a proporção de cada classe em relação ao total (WENDLING *et al.*, 2005).

$$\text{DMG} = \exp \left\{ \frac{\sum [(\ln [x_i] * [p_i])]}{\sum [p_i]} \right\} \quad \text{Equação 2}$$

em que $\ln[x_i]$ é o logaritmo natural do diâmetro médio das classes; e PI , o peso (g) retido em cada peneira (DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2011).

$$\text{IEA} = \{(P.A. - w_{p < 0,25}) / (P.A.)\} * 100 \quad \text{Equação 3}$$

O IEA representa uma medida da agregação total do solo e não considera a distribuição por classe de agregados; logo, quanto maior a quantidade de agregado, < 0,25 mm, menor será o IEA.

3.4.5. Índice de sensibilidade

Para comparar os valores de Ds, Ma, Mi e PT dos diferentes sistemas de manejo, utilizando a mata nativa como referência, será utilizado o índice de sensibilidade (Is) sugerido por Bolinder *et al.* (1999), que estima a intensidade das alterações dos atributos físicos do solo em razão das diferentes coberturas utilizadas. Esse índice foi calculado através da equação 4:

$$Is = as / ac \quad \text{Equação 4}$$

Em que: Is é o índice de sensibilidade; “as”, o valor da variável (Ds, Ma, Mi e PT) da área considerada em cada sistema de manejo avaliado; e “ac”, o valor da variável obtida na área de mata nativa (Testemunha). Quanto mais próximo da unidade estiver o Is, menor será a alteração provocada nos atributos avaliados.

3.5. Atributos Químicos

3.5.1. Coleta e preparo das amostras de solo

Em cada área, foram abertas 10 mini-trincheiras 0,50 x 0,50 m de superfície e 0,5 m de profundidade e coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 - 0,10 m; 0,10 - 0,20 m; 0,20 - 0,30 m; e 0,30 - 0,40m, posteriormente homogeneizadas de forma que foram obtidas cinco repetições de cada profundidade nas diferentes áreas, no início da estação chuvosa na região, para análise dos teores de nutrientes.

3.5.2. Análise de nutrientes

As amostras homogeneizadas foram secas ao ar e posteriormente enviadas para serem submetida à análise química, quantificando-se os teores de: fósforo e potássio determinados a partir de digestão nítrico-perclórica (TEIXEIRA *et al.*, 2017). A determinação de P foi feita por colorimetria (TEIXEIRA *et al.*, 2017). O cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (TEIXEIRA *et al.*, 2017), o carbono orgânico (C) por Walkley e Black modificado e o S por turbidimetria (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1985). Também foram quantificados teores de: manganês (Mn), zinco (Zn) cobre (Cu) e ferro (Fe) por espectrometria de absorção atômica (TEIXEIRA *et al.*, 2017), boro (B) por extração em água quente (RAIJ *et al.*, 2001).

3.5.3. Carbono orgânico total e estoque de carbono

Nas trincheiras foram coletas quatro amostras de solo em todas as parcelas nas mesmas profundidades (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m), para a determinação do teor de carbono orgânico total (COT), que foi quantificado segundo Yeomans e Bremner (1988), onde foram pesadas 0,5 g das amostras de terra fina seca ao ar (TFSA), macerada em porcelana e passada pela peneira de 60 mesh.

O material foi colocado em erlenmeyer de 250 mL, sendo em seguida, adicionados 5 mL de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ $0,167 \text{ mol L}^{-1}$) e 7,5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Posteriormente, foi aquecido em bloco digestor a $170 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min, adicionado 80 mL de água destilada e 0,3 mL da solução indicadora (fenantrolina), para depois então titular com a solução de sulfato ferroso amoniacal $0,2 \text{ mol L}^{-1}$.

Para o cálculo do EstC foi utilizado o método proposto por Fernandes e Fernandes (2013), que foi determinado a partir da equação 5.

$$\text{EstC (Mg ha}^{-1}\text{)} = [(C \times D_s \times e) / 10] \quad \text{Equação 1}$$

Em que C é o valor do teor de carbono orgânico total (COT) na camada (g kg^{-1}); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}); e = espessura da camada em análise (cm).

3.6. Análise estatística

Os resultados foram analisados quanto à normalidade e homogeneidade dos dados através dos testes de Lilliefors e Cochran e Bartlett, respectivamente. Posteriormente os resultados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F para significância e as médias comparadas foram agrupadas pelo método de Scott-Knott ($p < 0,05$), utilizando-se o programa estatístico AgroEstat.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Atributos Físicos

Analisando os valores obtidos para RP de forma isolada, observasse que as áreas no sistema agroflorestal (SAF) e com cana-de-açúcar (Cana) apresentam valores elevados, que variaram de 1,76 a 5,06 e 2,83 a 5,24 Mpa, respectivamente, sendo possível inferir que já está ocorrendo alguma restrição ao desenvolvimento radicular das plantas, enquanto o mesmo não

ocorre na área com pastagem (PA) e mata nativa (MN) (Tabela 1), considerando que o limite crítico aceito na literatura para RP seria de 2,0 Mpa (Silva *et al.*, 2008), contudo, Arshad, Lowery e Grossman (1996) e Suzuki *et al.* (2007) consideram que este limite crítico ocorre na faixa de 2,0 a 4,0 Mpa, para a maioria das culturas anuais.

Tabela 1 - Resistência à penetração das raízes (RP), densidade do solo (Ds) e umidade volumétrica (Uv) nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Profundidade	Sistemas de manejo			
	M	SAF	Cana	PA
RP (Mpa)				
0,00-0,10	1,76 cB	2,83 bA	1,52 aB	0,64 aC
0,10-0,20	4,07 bA	4,72 aA	2,01 aB	0,75 aC
0,20-0,30	5,06 aA	5,24 aA	2,08 aB	0,93 aC
0,30-0,40	4,39 aA	4,70 aA	1,96 aB	0,90 aC
CV (%)	14,65			
Ds (kg dm ⁻³)				
0,00-0,10	1,48 bC	1,86 aA	1,61 aB	1,13 cC
0,10-0,20	1,63 aB	1,80 aA	1,66 aB	1,40 aC
0,20-0,30	1,64 aB	1,76 bA	1,59 aB	1,37 aC
0,30-0,40	1,65 aB	1,74 bA	1,59 aB	1,24 bD
CV (%)	3,80			
Uv (cm ³ cm ⁻³)				
0,00-0,10	0,12 aB	0,12 aB	0,17 aB	0,68 aA
0,10-0,20	0,07 aB	0,17 aB	0,17 aB	0,75 aA
0,20-0,30	0,08 aB	0,07 aB	0,18 aB	0,74 aA
0,30-0,40	0,07 aB	0,11 aB	0,16 aB	0,67 aA
CV (%)	18,04			

Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas comparam as mesmas profundidades entre sistemas e as maiúsculas na coluna comparam as profundidades dentro de cada sistema de manejo, que não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). CV% = Coeficiente de variação. Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Contudo, ao analisar os valores da Ds, observa-se que somente na área com cana é que ocorre uma camada mais compactada, pois os valores variam entre 1,74 a 1,86 kg dm⁻³ nas

profundidades entre 0,10 e 0,40 m. O mesmo não ocorre no SAF, pois os valores variam entre 1,48 a 1,65 kg dm⁻³.

Considerando que o valor crítico de Ds estabelecido para o desenvolvimento radicular é de 1,55 kg dm⁻³ para solos com teor de argila variando entre 200 e 550 g kg⁻¹ (REINERT *et al.*, 2008) ou de 1,60 kg dm⁻³ proposto por Silva e Rosolem (2001), pode-se afirmar que realmente está ocorrendo restrição ao desenvolvimento radicular somente na área de cana, enquanto que na área com SAF e PA os valores estão muito próximos desta faixa limite, pois variaram entre 1,48 e 1,65 kg dm⁻³. Na área de MN os valores de Ds variaram de 1,13 a 1,40 kg dm⁻³, evidenciando que não existe qualquer impedimento ao sistema radicular das plantas.

Segundo Brady e Weil (2013), a Ds tende a aumentar à medida que aumenta a profundidade do perfil, sendo que isto se deve, provavelmente, ao menor teor de matéria orgânica, menor agregação, menos raízes e a um adensamento causado pela massa das camadas superiores.

Para os sistemas MN e SAF, os menores valores de Ds registrados na camada até 0,10m se dão pelo acúmulo de resíduos orgânicos na superfície e intensa variabilidade radicular. Isto também se relaciona com a maior quantidade de macroporos na profundidade em questão, em ambos os sistemas.

A matéria orgânica induz a maior atividade de microrganismos na subsuperfície, o que proporciona a formação de macroporos por meio das movimentações dos mesmos. As diferentes raízes proporcionam fenômeno parecido, ao promoverem maiores agregados e, conseqüentemente, poros de maiores tamanhos (LOSS *et al.*, 2015).

Analisando a primeira camada de análise, é possível notar que o SAF foi eficiente em diminuir o valor de densidade em relação à pastagem (Tabela 1). Isso se deve ao constante aporte de material orgânico no sistema, fato também foi apresentado pelos autores Barbosa *et al.* (2020), enquanto que autores Ribeiro *et al.* (2019) demonstraram que sistemas agroflorestais com dez anos foram eficientes, na camada mais superficial, em manter o valor de Ds próximo do observado em diferentes áreas com vegetações nativas.

Com relação a U_v, que é resultante da umidade gravimétrica (UG) multiplicada pela Ds, os valores observados na MN foram maiores que os obtidos na SAF, Cana e PA (Tabela 1), que pode ser justificado pelo período em qual foi feita a amostragem na área, que ocorreu no período chuvoso, com isso algumas áreas se encontravam alagadas e outras com lençol freático próximo ou na superfície.

Avaliando a qualidade física do solo em áreas sob manejo agroecológico e

convencional, onde as amostras foram coletadas na mesma época, Barbosa *et al.* (2020) observaram que a área sob manejo agroecológico apresentou melhor qualidade física do solo do que a área sob cultivo convencional em pousio e, que os indicadores demonstraram que a qualidade física do solo sob manejo conservacionista aproximou-se da área sob vegetação nativa atestando que a sustentabilidade ambiental desse manejo é superior ao convencional, diferentes dos resultados observados neste estudo, onde a MN apresentou U_v maior que os outros sistemas de manejo em todas as camadas de análise.

Os maiores valores de umidade volumétrica na área de vegetação nativa se devem ao acúmulo de serrapilheira e precipitação prévia ao momento de amostragem na área. Silva *et al.* (2022) demonstraram que existe correlação significativa com o acúmulo de resíduos orgânicos e conteúdo de água no solo em ambientes naturais florestados. Os autores mostraram que no mês com menor precipitação, Junho, obteve-se o maior conteúdo de água do solo, o que se deve ao acúmulo e armazenamento de água precipitada ao longo dos meses da primavera e verão, condicionados pelo acúmulo de serrapilheira.

Comparando os valores de U_v entre SAF, CA e PA, foi observado que não houve diferença estatística entre. Considerando a manutenção dos resíduos culturais nos sistemas SAF e CA, esperava-se que houvesse diferenças estatísticas, pois, tal estratégia tende a contribuir para manter maiores quantidades de água no solo em relação à sistemas de manejo que não existe aporte de material orgânico no solo.

Para os sistemas MN e SAF, os menores valores de D_s registrados na camada até 0,10 m são decorrentes do acúmulo de resíduos orgânicos na superfície e intensa variabilidade de sistema radicular, somado ao mínimo movimento de equipamentos agrícolas de elevada massa nestas áreas.

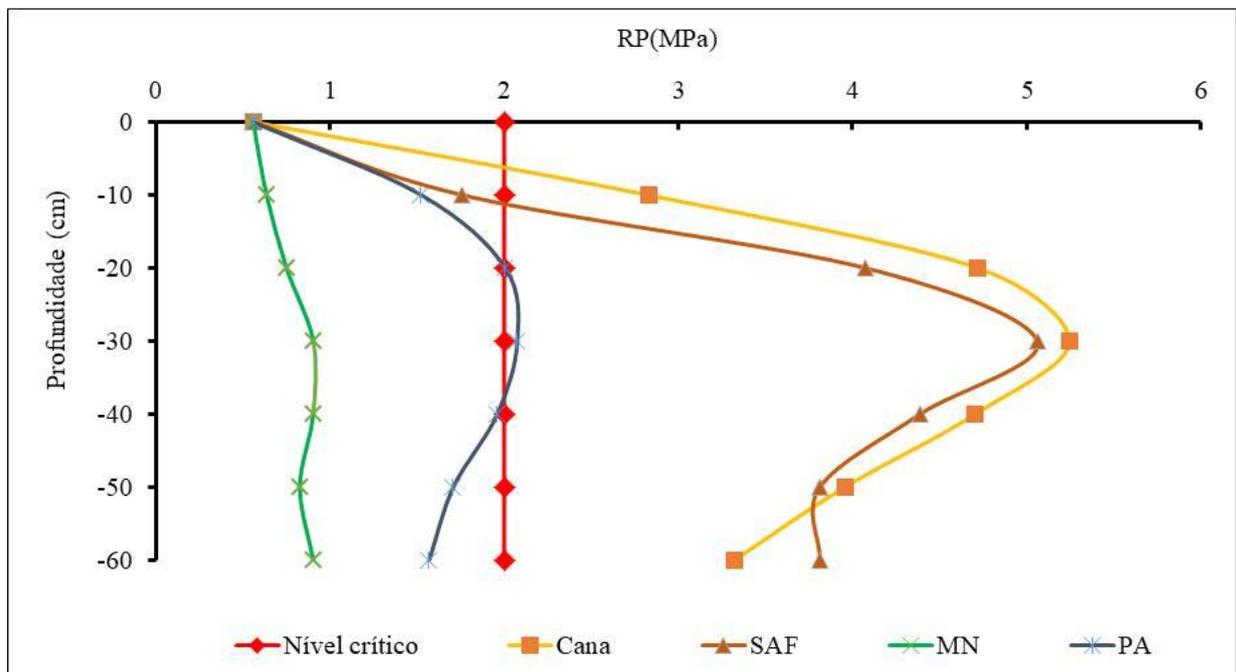
De forma geral, ao analisar D_s nas camadas do solo nas quatro áreas é possível afirmar que a D_s é menor a medida que diminui o tráfego de máquinas e implementos na área, que é na sequência Cana>PA>SAF>MN. Segundo Rossetti e Centurion (2013), a utilização de máquinas e implementos agrícolas de maior massa em locais ausentes ou com reduzida cobertura vegetal reflete nos atributos físicos do solo, ocorrendo à redução da porosidade total e da continuidade dos poros, a reorganização e distribuição das partículas e de seus agregados, ao aumento da compactação e D_s , com conseqüente redução da macroporosidade (M_a), inibindo assim o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas.

Segundo Santos *et al.* (2014), Mcphee *et al.* (2015) e Moraes *et al.* (2016), é comum ocorrer o adensamento das camadas superficiais e a compactação das subsuperficiais, devido

ao excesso de tráfego de com máquinas com massa superior ao suportado pela estrutura do solo ou pelas ações realizadas em ocasiões de umidade inadequada, que provocam restrição ao aprofundamento radicular, baixa atividade biológica, redução da macroporosidade, além de alterar a dinâmica do ar e água no solo.

Graficamente é possível observar que existe um pico de 5,24; 5,06; 2,08 e 0,90 Mpa nas áreas de cana, SAF, PA e MN, com Ds correspondente de 1,74; 1,64; 1,59 e 1,37 kg dm⁻³ na profundidade de 0,30 m, sendo os valores diminuem até 0,60 cm (Figura 7).

Figura 7 - Resistência mecânica à penetração das raízes no solo avaliada com o penetrômetro de impacto, nas áreas com diferentes sistemas de manejo, em Uberaba, MG, 2024.



Fonte: do autor, 2023.

Estes elevados valores de RP nas áreas em SAF e Cana, que variaram de 1,76 a 5,24 MPa, estão associados à baixa umidade volumétrica (U_v) que estava ocorrendo na área no momento da avaliação. Essa variação ocorreu de 0,07 a 0,17 cm³ cm⁻³, bem abaixo do valor de 0,33 cm³ cm⁻³ considerado ideal por Arshad, Lowery e Grossman (1996) para avaliar a RP, pois é quando o solo está na sua capacidade de campo, sendo este o momento que se obtém a melhor correlação deste atributo (RP) com o crescimento radicular.

Alguns autores já comprovaram existe uma correlação negativa entre RP x U_v e Ds x U_v , pois à medida que a U_v do solo diminui, a RP e a Ds tendem aumentar consideravelmente (SILVA *et al.*, 2008; TORRES *et al.*, 2015). Araújo, Tormena e Silva

(2004) obtiveram resultados semelhantes em seu estudo, onde a RP aumentou à medida que a umidade do solo diminuiu. Torres *et al.* (2012) avaliando uma área de pastagem observaram que Ds e Uv tiveram alta correlação e que os valores de RP correlacionaram negativamente com a Ds e Uv, ou seja, quanto maior foram estas duas variáveis, menor foi a RP, sendo que estas variações são semelhantes as observadas neste estudo.

De forma geral, os valores de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT) foram sempre superiores na MN em todas as profundidades avaliadas, quando comparado a área com SAF, Cana e PA, sendo que o mesmo não aconteceu para a relação Ma/PT, pois somente de 0,10 a 0,20 m apresentou valor significativamente superior (0,31%) às outras profundidades (Tabela 2).

Alguns valores de Ma na área com SAF (0,10 a 0,30 m), em todas as profundidades na área de cana (0 a 0,40 m), de 0,10 a 0,20 m em PA e de 0,30 a 0,40 m em MN, ficaram abaixo do valor limite de $10 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ (ou 10%), estabelecido por Kiehl (1979), que representa o limite crítico considerado impeditivo para o crescimento de raízes para culturas anuais, sendo que o autor acrescenta ainda que o solo ideal é aquele que contém 1/3 de Ma ($34 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 34%) e 2/3 de Mi ($66 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 66%). De acordo com Michelon *et al.* (2007), este valor mínimo de $10 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ (ou 10%) é apropriado para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, sendo crítico para o desenvolvimento de raízes da maioria das culturas.

Segundo Viana *et al.* (2011), durante o processo de adensamento das camadas ou compactação do solo, os macroporos responsáveis pela aeração do solo diminuem e são substituídos por microporos. Isto evidencia o problema causado pelo tráfego de máquinas e transbordo nas áreas de cana-de-açúcar, durante a implantação, condução e colheita mecanizada da cultura. Comportamento este que parece ter ocorrido neste estudo, pois a área de Cana é a única que se encontra com problemas sérios de compactação do solo.

Essa relação de proporcionalidade inversa entre Ma e Ds é também reportada pelos autores Beutler, Centurion e Roque (2004) e Araújo, Goedert e Lacerda (2007). Torres *et al.* (2015) citam tal efeito negativo na densidade e nos macroporos em sistema de semadura direta pelo uso de máquinas. Lago, Lacerda e Neumann (2012) afirmam que em solo sob plantio direto é comum observar o adensamento de camadas mais próximas da superfície, como foi o caso observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (PT) e relação entre Ma/PT nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Prof	Ma	Mi	PT	Ma/PT
M dm ⁻³ dm ⁻³			
SAF				
0,00-0,10	17,63 aB	26,39 aB	44,30 aB	0,40 aA
0,10-0,20	5,99 cC	26,73 aB	32,87 cB	0,16 bC
0,20-0,30	5,09 cC	29,05 aB	30,72 cC	0,17 bB
0,30-0,40	13,32 bA	26,24 aB	37,21 bB	0,37 aA
Cana				
0,00-0,10	4,66 bD	24,66 aB	30,77 bD	0,15 cC
0,10-0,20	8,34 aB	25,79 aB	34,27 aB	0,24 aB
0,20-0,30	9,11 aB	25,05 aC	35,37 aB	0,26 aA
0,30-0,40	7,61 aB	27,56 aB	35,28 aB	0,20 bC
PA				
0,00-0,10	13,12 aC	26,44 aB	40,41 aC	0,34 aB
0,10-0,20	9,33 bB	26,49 aB	36,14 aB	0,26 bB
0,20-0,30	11,14 bA	26,04 aC	37,28 aB	0,30 bA
0,30-0,40	11,17 bA	26,86 aB	38,15 aB	0,29 bB
MN				
0,00-0,10	22,43 aA	43,07 aA	58,67 aA	0,32 aB
0,10-0,20	14,92 bA	36,16 cA	52,34 bA	0,31 aA
0,20-0,30	11,84 cA	39,90 bA	51,69 bA	0,21 bB
0,30-0,40	8,87 dB	39,82 bA	49,62 bA	0,18 bC
CV (%)	16,33	8,18	6,11	12,65

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades e maiúsculas nas colunas os tratamentos nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

A maior macroporosidade, assim como maior porosidade total em área de mata nativa na profundidade até 0,10m, também foram registradas pelos autores Cunha *et al.* (2012). Todavia, os maiores valores de microporosidade em MN (Tabela 2), quando comparados aos outros sistemas, não corrobora o que foi divulgado pelos autores supracitados ao avaliarem o impacto nos atributos edáficos por diferentes sistemas de cultivo orgânico.

Avaliando a relação Ma/PT, observou-se que somente na área em SAF, na profundidade de 0,10 a 0,20 m ($0,40 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 44%) e de 0,30 a 0,40 m ($0,34 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 34%) e em PA de 0,0 a 0,10 m ($0,34 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ ou 34%) é que houve aumento significativo desta relação, quando comparados as áreas em Cana e MN, que tiveram valores acima de $0,33 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ (Tabela 2), valor este considerado ideal de cerca de 1/3 da PT, conforme sugerido por Taylor e Aschcroft (1972).

Para Bertol *et al.* (2004) o valor de $0,33 \text{ dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ é limitante ao desenvolvimento radicular, reduz a taxa de difusão de gases no solo e dificulta a drenagem do excesso de água das chuvas, em seu estudo observou valores acima 0,40, 0,20 e 0,20 $\text{dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ na profundidade até 0,05 m e valores mínimos acima de 0,07, 0,10 e 0,15 $\text{dm}^{-3} \text{ dm}^{-3}$ nas profundidades entre 0,05 e 0,30 m, para as áreas em cultivo convencional, SPD e MN, respectivamente.

Analisando a distribuição dos agregados por classes do diâmetro, de forma geral, foi notado que as maiores porcentagens de agregados nas áreas em estudo ficaram retidas nas peneiras de 2,00 mm, entretanto, os valores obtidos nos sistema de manejo SAF, PA e MN foram significativamente superiores (cerca de 50%), quando comparados à área de Cana, que foi a única que apresentou problemas visíveis com compactação do solo (Tabela 3).

Na profundidade até 0,10 m, as áreas em SAF e PA se destacaram, indicando que os agregados formados são bastante estáveis em água em tamanhos maiores, pois ficaram retidos em maior quantidade na peneira de 2 mm, que foram significativamente superiores aos observados na área com Cana e MN, sendo que o último normalmente é aquele que recebe maiores aportes de resíduos vegetais dada a deposição da serapilheira. Esse comportamento pode estar relacionado à diversidade de sistemas radiculares existentes na área em SAF e manutenção da pastagem com gramínea por um longo período.

Segundo Coutinho *et al.* (2010), nas áreas cultivadas com gramíneas, onde a deposição resíduos vegetais na superfície é elevada e na subsuperfície pelos remanescentes do sistema radicular fasciculado, que a associação com fungos e outros organismos que atuam na decomposição destes resíduos orgânicos, beneficia a formação de agregados de maior tamanho e estabilidade nessa camada.

Tabela 3 - Distribuição dos agregados por classes do diâmetro, nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Prof.	Classes de agregados por peneira					
	2,00	1,00	0,50	0,250	0,106	<0,106
M%.....					
SAF						
0,00-0,10	88,72aA	1,10 aA	1,35 bB	1,43 bB	2,60 aB	4,81 aB
0,10-0,20	77,50 aA	2,42 aA	3,45 bB	5,53 bB	5,86 aB	5,24 aB
0,20-0,30	62,07 bA	4,52 aA	7,63 aB	11,25 aB	9,41 aB	5,11 aB
0,30-0,40	59,93 bA	4,82 aA	10,50 aB	14,12 aB	9,64 aB	5,97 aB
Cana						
0,00-0,10	33,60 aC	4,82 aA	7,78 cA	24,20 aA	18,52 aA	10,75 aB
0,10-0,20	22,25 aB	5,37 aA	13,90 bA	24,91 aA	22,18 aA	11,39 aB
0,20-0,30	16,67 aB	6,55 aA	17,68 aA	29,38 aA	20,13 aA	9,59 aB
0,30-0,40	18,55 aB	7,62 aA	20,45 aA	24,74 aA	19,09 aA	9,52 aB
PA						
0,00-0,10	78,88 aA	1,13 aA	1,11 aB	2,67 aB	4,80 aB	11,41 aB
0,10-0,20	75,52 aA	1,48 aA	1,82 aB	3,59 aB	5,18 aB	12,40 aB
0,20-0,30	69,11 aA	1,91 aA	3,16 aC	6,24 aB	6,45 aB	13,13 aB
0,30-0,40	65,87 aA	3,18 aA	4,17 aC	6,74 aC	6,98 aB	13,06 aB
MN						
0,00-0,10	56,73 aB	1,46 aA	0,93 aB	1,26 aB	1,95 aB	37,33 aA
0,10-0,20	64,40 aA	2,72 aA	1,97 aB	2,83 aB	2,82 aB	25,25 bA
0,20-0,30	61,33 aA	4,34 aA	3,48 aC	3,17 aB	3,06 aB	24,61 bA
0,30-0,40	63,45 aA	3,50 aA	3,46 aC	2,68 aC	2,75 aB	24,15 bA
CV %	17,78	60,83	37,64	38,44	46,44	30,64

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades em cada sistema de manejo e maiúsculas comparam os sistemas nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Prof. = Profundidade.

Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

Avaliando o carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar, Souza, Marcelo e Centurion (2012) relatam que o sistema radicular fasciculado das gramíneas apresenta efeito rizosférico intenso, que ao ser

decomposto liberam nutrientes e contribui para a formação da matéria orgânica do solo, favorecendo intensamente seu estado de agregação.

Segundo Silveira *et al.* (2011), destacam os resíduos das Poáceas apresentam um efeito positivo sobre a agregação do solo, os resíduos destas plantas promovem a melhoria do solo por conterem maior quantidade de lignina, substância que possibilita o aumento de ácidos carboxílicos e ácidos húmicos nos substratos, que favorecem a estruturação e a estabilidade dos agregados, além disso, as raízes destas plantas apresentam alta densidade, que favorece a aproximação das partículas pela constante absorção de água do perfil e de periódicas renovações do sistema radicular.

Na área de MN a quantidade de agregados menores no mínimo 50% maior, quando comparado aquelas retidas nas áreas de Cana, SAF e PA, que provavelmente está relacionado a maior ocorrência de microagregados menores ou iguais a 0,106 mm de diâmetro, que ocorre em áreas com as maiores teores de matéria orgânica em elevado estado de decomposição

Avaliando o carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto em áreas de pastagem, lavoura e floresta em solos na região Sul do país, Ferreira *et al.* (2007) encontraram maiores proporções de agregados estáveis em água na classe de 8 a 2 mm nas áreas cultivadas com Poáceas (pastagem).

Esses resultados demonstram que no geral o sistema agroflorestal foi aquele com a maior média de ocorrência de macroagregados, atingindo 87,84% (Tabela 3). Tal fato se deve ao grande aporte de resíduos orgânicos no sistema, que eleva a atividade biológica no solo, conforme destacado por Loss *et al.* (2015), ao revelar que o plantio com base agroecológica tende a apresentar agregados de maior diâmetro, pelo efeito da glomalina produzida por fungos associados às raízes.

Considerando-se os parâmetros para classificação dos agregados entre macro ($>0,25\text{mm}$) e micro ($<0,25\text{mm}$) determinada por Tisdall e Oades (1982), é possível dizer que na camada mais superficial da SAF, até 10 cm de profundidade, aproximadamente 92,6% são macroagregados, enquanto que nos sistemas PA, CA e MN, os valores são de 83,79, 70,73 e 60,7%, respectivamente. A menor média registrada de agregados maiores que 0,25 mm ocorreu na área de MN, com 69,52% de macroagregados, ao se avaliar todas as profundidades (Tabela 3), fato este que deve estar relacionado ao excesso de umidade na área durante período de amostragem.

A formação de microagregados é função da interação de moléculas orgânicas, cátions e óxidos de ferro (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011), todos observados em abundância na

área de MN, entretanto, dada a situação observada em campo, na qual foi presenciada uma erosão já avançada em condição de ravinamento, entre a área de Cana e MN, o transporte de partículas mais finas de solo durante os períodos de precipitação pode ser um fator e contribuir para esse comportamento.

No local de cultivo de cana-de-açúcar ocorreu uma melhor distribuição entre as classes, sendo o sistema que teve as maiores porcentagens das classes intermediárias, entretanto, é quantidade de macroagregados no sistema em questão também foi baixa e praticamente igual ao observado em MN, com 69,71% (Tabela 3).

Em seu estudo, Silva e Mielniczuk (1998) citam que o solo sob maquinário tende a sofrer mudanças no tamanho e estabilidade dos agregados, esses efeitos deletérios na agregação do solo condicionados pelas operações periódicas na cultura da cana também são evidenciados por Souza, Marcelo e Centurion (2012). As consequências do fracionamento dos agregados são elucidadas por Loss *et al.* (2009b), ao indicarem que um alto número de microagregados induz uma predisposição para erosão hídrica na área.

Após a determinação da distribuição dos agregados por classes do diâmetro, aplicou-se a metodologia para cálculo dos índices de estabilidade de agregados estáveis em água (IEA), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice AGRI sobre os valores obtidos e, constatou-se que de forma geral, todos os índices foram superiores ($p < 0,05$) na camada superficial (0,00-0,10 m) e diminuíram em profundidade (Tabela 4).

Maiores valores de DMG nas menores profundidades também foram reportados pelos autores Almeida *et al.* (2014) ao avaliarem agregação do solo em diferentes ambientes. Outra constatação geral é que os índices obtidos no SAF e na pastagem foram iguais estatisticamente e superiores aos valores de CA e MN. Esperava-se que o DMP, DMG, IEA e AGRI apresentassem valores mais altos nas áreas onde também ocorrem incorporação de matéria orgânica, via aporte de resíduos das culturas anteriores, como ocorre na Cana, e via depósito de serapilheira como ocorre na área em MN, conforme destacado por Lima, Silva e Silva (2013).

Porém, isso não ocorreu neste estudo. Talvez por que esta duas áreas estivessem com problemas sérios de compactação na área de Cana e a de MN com de excesso de água, sendo presenciada situação de encharcamento devido às chuvas ocorridas no período de amostragem. Esses baixos valores em índices de agregação sob vegetação nativa, especificamente na camada até 0,10m (Tabela 4), divergem dos resultados apresentados por Cunha *et al.* (2012).

Tabela 4 - Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (AGRI), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA).

Prof	DMP	DMG	IEA	AGRI
Mmm.....	%	
SAF				
0,00-0,10	4,47 aA	3,46 aA	92,57 aA	88,72 aA
0,10-0,20	4,10 aA	2,67 bA	88,89 aA	77,50 aA
0,20-0,30	3,29 bA	1,84 cA	85,48 aA	62,07 bA
0,30-0,40	2,97 bA	1,63 cA	84,38 aA	54,93 bA
Cana				
0,00-0,10	1,73 aC	0,78 aC	70,91 aB	33,60 aC
0,10-0,20	1,44 aB	0,60 aC	65,77 aB	22,25 aB
0,20-0,30	1,22 aB	0,58 aB	70,28 aB	16,67 aB
0,30-0,40	1,33 aB	0,61 aB	71,37 aB	18,55 aB
PA				
0,00-0,10	4,00 aA	2,30 aB	83,86 aA	78,88 aA
0,10-0,20	3,84 aA	2,07 aA	82,42 aA	75,52 aA
0,20-0,30	3,56 aA	1,76 aA	80,63 aA	69,11 aA
0,30-0,40	3,42 aA	1,65 aA	79,96 aA	65,87 aA
MN				
0,00-0,10	2,89 aB	0,79 aC	60,22 bC	56,73 aB
0,10-0,20	3,31 aA	1,29 aB	71,93 aB	64,40 aA
0,20-0,30	3,19 aA	1,24 aA	72,33 aB	61,33 aA
0,30-0,40	3,28 aA	1,31 aA	73,10 aB	63,45 aA
CV (%)	17,28	24,16	7,71	17,78

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades e maiúsculas os tratamentos nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

A proximidade dos valores de DMP e DMG entre os sistemas SAF e PA se deve ao fato que a área do SAF integrava a mesma área de pastagem até que o sistema fosse implantado. Analisando ambos os índices, só ocorreu diferença significativa ($p < 0,05$) na

profundidade até 0,10m para DMG, sendo que o maior valor ocorreu no SAF. Dessa forma, pode-se afirmar que em cinco anos o sistema agroflorestal formou agregados maior diâmetro em relação a sua condição inicial, na profundidade até 0,20 m.

Os valores altos obtidos no SAF coincidem com outros observados anteriormente na literatura. Em plantio agroecológico existe a tendência de ocorrência de agregados maiores nas camadas mais superficiais do solo, quando comparados aos demais sistemas de plantio, devido à maior quantidade de carbono e matéria orgânica aportados no agroecossistema (LOSS *et al.*, 2009b)

Segundo Loss *et al.* (2015), ocorre intensa ação dos variados sistemas radiculares nos SAF's, que liberam exsudatos, como a principal razão para esse comportamento. A melhoria nos agregados também acontece para pastagens bem manejadas, pois as raízes de gramíneas contribuem para sua formação e estabilização (SILVA; MIELNICZUK, 1998; SOUZA; MARCELO; CENTURION, 2012).

Com os maiores valores de DMP registados nos sistemas SAF e PA pode-se inferir esses locais estão menos sujeitos a processos erosivos, pois esse índice indica a quantidade de agregados de maior diâmetro, inibem o escoamento superficial, os quais favorecem a infiltração da água e as trocas gasosas (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

Na área de cana-de-açúcar foram registrados os menores valores de DMG e DMP, para as camadas de 0,10-0,20m, 0,20-0,30m e 0,30-0,40m (Tabela 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Fontana *et al.* (2010), que justificou que este comportamento se deve ao processo tradicional de preparo do solo destas áreas e ao posterior tráfego intenso de máquinas e equipamentos agrícolas para transbordo da produção, que causam a compactação do solo. Souza, Marcelo e Centurion (2012) também apresentam resultados em que as operações necessárias na cultura da cana induziram ao fracionamento de agregados, principalmente na camada até 0,10m.

Os autores Demarchi, Perusi e Pirolli (2011) concluem que um sistema de pastagem apresenta melhor qualidade estrutural de agregados em relação à mata nativa e área com de cana-de-açúcar, o que corrobora os apresentados na Tabela 4.

Foi evidenciado por Torres *et al.* (2015) que altos valores de IEA são resultados da boa proteção do solo proporcionada pelos resíduos orgânicos aportados no sistema contra as gotas de chuva. No SAF esses resíduos são abundantes, principalmente nas linhas de cultivo, o que explica um alto valor no índice de estabilidade de agregados no sistema, principalmente para a primeira camada.

Há de se destacar também a função das árvores com estrato alto na proteção do solo contra a força desagregante das gotas de chuva. A distribuição de diferentes espécies vegetais de grande porte no complexo, como as mangueiras (*Mangifera indica*), cria uma zona de recepção das gotas sobre o solo, o que diminui a velocidade das mesmas durante os eventos de precipitação.

4.2. Atributos Químicos

De forma geral, as áreas de Cana e MN apresentaram o potencial hidrogeniônico (pH) em Cloreto de cálcio (CaCl_2) variando entre 5,15 e 5,65, na faixa ideal (próximo de 5,3) para o desenvolvimento das plantas, onde os teores de Ca e Mg são mais elevados, enquanto o mesmo não ocorre nas áreas em SAF e PA, onde o solo encontra-se com o pH ácido, variando entre 4,27 a 5,0 e precisando de correção com calcário. Contudo, as áreas em SAF e MN são aquelas que apresentam melhor fertilidade nas análises químicas realizadas, que provavelmente está relacionado aos maiores teores de matéria orgânica encontrados (Tabela 5).

As áreas de cana-de-açúcar e mata nativa apresentam resultados estatisticamente semelhantes em todas as profundidades ($p < 0,05$). Para a área de cana-de-açúcar, esses valores se devem às operações de correção de acidez. A menor média de pH registrada foi para a pastagem (Tabela 5), o que indica uma condição mais ácida para nesse sistema de manejo. As áreas de cana-de-açúcar e mata nativa apresentam resultados estatisticamente semelhantes em todas as profundidades. Esses valores se devem a correção periódica do solo no cultivo da gramínea e à quantidade de bases trocáveis registradas no sistema MN.

Quando comparando as áreas do SAF e pastagem, nota-se diferença estatística ($p < 0,05$) somente na camada até 0,10 m (Tabela 5). Essa diferença pode ser explicada pela aplicação de corretivo de acidez ocorrida no início da estruturação do SAF, tendo em vista que essa área compunha o pasto. Iwata *et al.* (2020) também registraram aumento do pH com implantação de um SAF em apenas 6 anos e provam que esse valor tende a subir com o passar dos anos, ao demonstrarem maior pH em outro SAF com 13 sobre mesmo solo.

Portanto, tais resultados divergem aos apresentados pelos autores Loss *et al.* (2009c), ao reportarem maior pH para pastagem quando comparada a um sistema agroflorestal. Todavia, os autores justificam a menor acidez da pastagem com a aplicação periódica de correção, no momento de renovação da pastagem.

Tabela 5 - Teores de Matéria Orgânica (MO), potencial hidrogeniônico (pH), Potássio (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba-MG, 2024.

Prof.	pH	P	K	Ca	Mg	S	MO
M	Ca Cl ₂	mg dm ⁻³mmolc dm ⁻³			mg dm ⁻³	g kg ⁻¹
SAF							
0,00-0,10	5,00 aB	14,47 aA	1,12 aB	23,07 Ab	6,47 aB	0,62 bB	21,89 aB
0,10-0,20	4,77 aB	11,37 bA	0,92 bB	16,30 aB	4,52 bB	0,82 bB	16,24 bB
0,20-0,30	4,67 aB	10,32 bA	0,87 bB	12,90 aB	5,02 bB	1,80 aB	17,58 bB
0,30-0,40	4,52 aB	7,17 cA	0,75 bB	9,77 aB	3,47 bB	2,07 aC	12,27 bB
Cana							
0,00-0,10	5,50 aA	4,92 aB	0,67 aC	29,27 aB	4,62 aB	2,00 cA	10,55 aC
0,10-0,20	5,65 aA	4,85 aB	0,50 aC	27,40 aB	5,50 aB	2,17 cA	9,22 aC
0,20-0,30	5,52 aA	4,42 aC	0,40 aC	15,87 aB	5,37 aB	3,72 bA	8,28 aC
0,30-0,40	5,15 aA	3,37 aC	0,40 aC	9,90 aB	3,90 aB	11,27 aA	7,50 aB
PA							
0,00-0,10	4,42 aC	6,42 aB	0,40 aD	28,40 aB	2,47 aC	0,57 bB	11,93 aC
0,10-0,20	4,37 aB	6,22 aB	0,30 aC	26,07 aB	1,17 aC	0,82 bB	9,34 aC
0,20-0,30	4,27 aB	6,50 aB	0,22 aC	23,60 aB	1,22 aC	1,27 bB	8,57 aC
0,30-0,40	4,27 aB	5,97 aB	0,12 aD	20,30 aB	0,70 aC	2,72 aB	8,05 aB
MN							
0,00-0,10	5,72 aA	13,97 aA	2,20 aA	323,47 aA	16,02 aA	0,87 bB	82,58 aA
0,10-0,20	5,60 aA	10,65 bA	2,00 aA	284,42 bA	14,32 aA	1,05 bB	73,27 bA
0,20-0,30	5,57 aA	10,30 bA	1,72 bA	209,97 cA	12,57 bA	1,80 aB	58,82 cA
0,30-0,40	5,47 aA	8,27 cA	1,32 cA	168,07 dA	10,12 cA	1,72 aC	45,03 dA
CV %	6,95	14,65	19,38	17,84	21,21	24,62	14,45

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades e maiúsculas nas colunas os tratamentos nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

Avaliando sistemas de manejo conservacionistas que aportam quantidades consideráveis de matéria orgânica na superfície do solo, Nascente *et al.* (2015) observaram que este sistema promove incrementos no teor de nutrientes, matéria orgânica, melhora a

capacidade de troca catiônica e saturação a medida em que as safras vão se sucedendo, principalmente nas camadas mais superficiais.

Ainda que com valores considerados baixos a muito baixos (ALVAREZ *et al.*, 1999), o SAF se destacou nos teores de P e não foi notada diferença estatística ($p < 0,05$) em relação aos teores observados em MN (Tabela 5). O bombeamento desse nutriente através das raízes profundas das árvores de grande porte no SAF também contribui para explicar esses valores. O destaque para o componente arbóreo nos SAF's que induz maior produção de biomassa a ser transformada em resíduo aportado e, conseqüentemente, maior ciclagem de nutrientes no agroecossistema, também é evidenciado pelos autores Campanha *et al.* (2007).

A quantidade de fósforo diminuiu com o aumento da profundidade, apresentando diferenças estatísticas ($p < 0,05$) entre as profundidades dentro dos sistemas SAF e MN (Tabela 5). O decréscimo nos teores de P com a profundidade também foram observados por Souza e Alves (2003), assim como pelos autores Rosa *et al.* (2003). O não revolvimento do solo em conjunto com o intenso aporte de resíduos orgânicos em ambos os sistemas contribui para o acúmulo de P na camada mais superficial.

Isso também é constatado por Marin (2002) ao avaliar os impactos da adoção de um sistema agroflorestal com café na qualidade de solo da região da zona da mata mineira. O autor detalha que o maior valor de P em sistema agroecológico, quando comparado a sistema convencional, deve-se a maior entrada de serrapilheira. Além disso, destaca que de 15 a 80% do P disponível no solo tem provável origem na decomposição da matéria orgânica, o que ajuda a compreender os maiores valores em MN e no SAF.

Barreto *et al.* (2006), avaliando as características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia, também registraram maior valor no teor de P na camada até 0,10m quando comparado a pastagem. Pereira *et al.* (2010) destacam que altos teores de MO leve no solo diminuem o processo de adsorção de P, comportamento este que facilita o entendimento dos altos valores no SAF e MN.

Em um sistema natural, como é o caso de MN, a disponibilidade deste P está intimamente ligada à ciclagem orgânica dos nutrientes (SANTOS, GATIBONI & KAMINSKI, 2008). Segundo Vasconcellos e Beltrão (2018), nos sistemas agroflorestais, onde se busca simular cadeias tróficas e interações biológicas características de áreas com vegetação natural, a atividade biológica é intensa ao nível de solo, o que sustenta justifica os resultados observados neste estudo.

No SAF nunca houve adição de adubo fosfatado e, mesmo assim, nas quatro

profundidades, os teores de P foram maiores que nos tratamentos: CA e PA, levando a resultados distintos dos autores Loss *et al.* (2009c), que mostram maior teor de P em pastagem quando comparada a um sistema agroflorestal.

Tais resultados podem sugerir uma maior sustentabilidade de agroecossistemas baseados nos princípios da Agroecologia, condizente com Martin e Isaac (2018). Pois aqui se trata de um sistema em que não há necessidade de aplicação de adubos fosfatados de origem inorgânica, oriundos de fontes finitas e que elevam o custo de produção para o produtor. Além disso, boa parte do P aplicado, como ocorre na área de cultivo de cana-de-açúcar, não permanece disponível para a cultura, sendo facilmente adsorvido e posteriormente lixiviado, podendo causar eutrofização de corpos hídricos à jusante.

Assemelhando-se aos comportamentos observados das concentrações de P, os teores de K trocável diminuíram conforme o aumento das profundidades, para todos os tratamentos analisados (SAF, CA, PA e MN) (Tabela 5). De acordo com Alvarez *et al.* (1999), os valores de potássio observados nos quatro sistemas estão baixos. Sendo que os maiores valores registrados ocorreram na MN, nos quatro intervalos de profundidade estudados, o que se deve à maior ciclagem de nutrientes nesse sistema. Ribeiro *et al.* (2019) ao avaliarem fertilidade de diferentes sistemas agroflorestais também observaram que ocorre esse decréscimo nos teores de K, Ca, Mg e S com a profundidade.

O fato de a pastagem ter apresentado os menores teores de K corrobora o que foi concluído pelos autores Ferreira *et al.* (2011), que detalharam que a intensidade do pastejo contribui para melhor ciclagem de K, comportamento este também verificado neste estudo, considerando que a área é pouco utilizada para pastejo de bovinos na propriedade. Klug *et al.* (2020) também atestaram tal comportamento dos teores de K e, além disso, também observam diminuição nos teores de Ca e Mg conforme aumento da profundidade. Neste estudo foi observado que os teores de Mg não foram alterados com o aumento da profundidade para os sistemas SAF, CA e PA, sendo isto evidenciado somente na MN.

Os valores mais altos de cálcio constatados no sistema MN provavelmente se devem ao fluxo subsuperficial de água que carregam solutos, sedimentos e nutrientes de partes mais altas da paisagem. Skorupa *et al.* (2012) descrevem esses processos como característicos em matas ciliares, como é o caso deste presente estudo.

Considerando os parâmetros propostos por Alvarez *et al.* (1999), os macronutrientes Ca e Mg nos sistemas SAF, MN e CA apresentam valores bons a muito bons. Tendo em vista que os maiores valores de Mg foram observados na área de mata nativa, pode-se dizer que tais

valores estão diretamente ligados à maior presença de resíduos orgânicos depositados via serrapilheira. SAF e CA não se diferem entre si ($p < 0,05$), indicando que o plantio direto sobre os resíduos culturais atua de forma semelhante em ambas as áreas.

Em relação aos teores de S, foi constatado que a área de cana-de-açúcar apresentou os resultados mais altos. Isto se deve à aplicação do nutriente via fertilização, pois, conforme destacado por Nicchio (2018), o S é um nutriente imprescindível para bons rendimentos nos cultivos de cana-de-açúcar.

Ao comparar COT em plantio convencional com plantio agroecológico, Loss *et al.* (2015) encontraram maior quantidade de carbono na primeira camada de solo analisada. Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998) também demonstraram maior quantidade de carbono oriundo de material orgânico no primeiro intervalo de profundidade. Sabe-se que a MO no solo possui influência direta na qualidade dos agregados do solo (LOSS *et al.*, 2009b), fato que sustenta os resultados de DMP e DMG no SAF superiores aos demais sistemas.

Em relação a nutrientes secundários, os resultados demonstram que a mata nativa se destacou nos teores de Fe, Zn, Mn e B (Tabela 6). As diferentes composições de resíduos orgânicos acumulados na superfície do solo sob esse sistema explicam tais resultados, conforme elucidado por Cunha *et al.* (2012).

Os menores teores de MO foram obtidos nos sistemas CA e PA. Tal fato diverge das constatações realizadas pelos autores Souza e Alves (2003), ao dizerem que o SPD e sistema de cultivo mínimo em Latossolo vermelho distrófico provocaram aumento significativo na matéria orgânica do solo, fazendo com que permanecesse em níveis similares ao notado em área com vegetação natural no Cerrado.

A disponibilidade de Mn nos solos tropicais tende a ser prejudicada pela calagem, quando não feita corretamente (ALVAREZ *et al.*, 1999; OLIVEIRA JUNIOR, MALAVOLTA; CABRAL, 2000), fato que pode explicar menores valores no SAF, considerando que já foi realizada a correção no sistema. Nos sistemas SAF e PA, observou-se decréscimo nos teores proporcionalmente às maiores profundidades. Em CA e MN houve aumento da disponibilidade de Mn até 0,20m e, posteriormente, diminuição nos valores para as maiores profundidades.

Tabela 6 - Teores de manganês (Mn), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Prof.	Mn	B	Cu	Fe	Zn
Mmg/dm ³				
SAF					
0,00-0,10	3,77 aB	0,07 aB	0,62 aA	115,20 aB	1,80 aB
0,10-0,20	1,95 bC	0,07 aB	0,65 aA	62,92 bB	1,62 aB
0,20-0,30	1,72 bB	0,07 aB	0,67 aA	51,60 bB	0,72 bB
0,30-0,40	1,40 bC	0,07 aA	0,55 aA	30,22 cB	0,52 cB
Cana					
0,00-0,10	4,12 aB	0,05 aB	0,40 aB	18,60 aC	1,97 aB
0,10-0,20	4,32 aB	0,05 aB	0,32 aB	15,12 aC	1,12 bC
0,20-0,30	2,27 bB	0,05 aB	0,30 aB	10,07 aC	0,62 cB
0,30-0,40	1,30 cC	0,05 aA	0,32 aB	9,72 aC	0,55 cB
PA					
0,00-0,10	3,45 aB	0,07 aB	0,45 aB	18,20 aC	0,40 aC
0,10-0,20	2,50 bC	0,05 aB	0,42 aB	12,62 aC	0,32 aD
0,20-0,30	2,25 bB	0,05 aB	0,37 aB	13,40 aC	0,30 aC
0,30-0,40	2,27 bB	0,02 aA	0,35 aB	9,12 aC	0,30 aC
MN					
0,00-0,10	5,50 bA	0,20 aA	0,35 aB	156,52 cA	2,72 aA
0,10-0,20	8,67 aA	0,20 aA	0,37 aB	266,37 aA	2,22 bA
0,20-0,30	4,32 cA	0,20 aA	0,40 aB	222,27 bA	1,80 cA
0,30-0,40	4,05 cA	0,10 bA	0,42 Ab	211,12 bA	1,12 dA
CV %	16,65	53,45	19,52	14,81	11,13

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades e maiúsculas nas colunas os tratamentos nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

Conforme destacado por Oliveira Junior, Malavolta e Cabral (2000), a disponibilidade de Mn depende de um conjunto de fatores como acidez do solo, teor de matéria orgânica e equilíbrio com outros elementos, sendo o primeiro fator o mais importante. Os autores destacam ainda que em condições de pH mais elevado, caso da mata nativa, a disponibilidade

de Mn tende a diminuir pelos processos de oxidação do elemento. Logo, as maiores quantidades de Mn na área de mata nativa provavelmente se devem às maiores quantidades de matéria orgânica.

O efeito das profundidades não foi significativo para os teores de B, demonstrando que estes foram homogêneos entre as profundidades de cada sistema de manejo e muito baixos (ALVAREZ *et al.*, 1999), principalmente nos sistemas SAF, PA e CA (Tabela 6), o que era esperado. Mattiello *et al.* (2009) evidenciaram que a deficiência desse nutriente é uma característica de solos do cerrado. Os autores também relataram sobre a relação entre longos períodos de déficit hídrico, o que pode ocorrer no Cerrado, com a baixa disponibilidade de B.

Portanto, essas considerações podem explicar a significativa superioridade ($p < 0,05$) dos teores de boro na mata nativa. Além de estar à jusante dos demais sistemas, sendo uma zona de recepção tanto do escoamento de água e sedimentação, a maior quantidade de serrapilheira contribui para a retenção de água, facilitando o transporte de boro no solo.

O SAF apresentou os teores de Cobre (Cu) significativamente mais altos dentre as áreas avaliadas ($p < 0,05$) (Tabela 6). Todavia, esses valores podem ser considerados baixos pelos autores Alvarez *et al.* (1999). A incorporação de dejetos animais pode ter contribuído para os valores observados. Wastowski *et al.* (2010) relacionaram maiores teores de cobre com a aplicação recorrente de dejetos animais. Em todos os sistemas, não houve diferenças significativas para as diferentes profundidades, sendo que no SAF os teores de Cu aumentaram ligeiramente até 0,30m e em MN, até 0,40m. Comportamento contrário foi observado para as áreas PA e CA.

As maiores quantidades de ferro se relacionam com a presença de substâncias orgânicas, que tendem a aumentar a solubilidade do elemento através do ciclo biogeoquímico, (BARBOSA FILHO; DYNIA; FAGERIA, 1994). Cunha *et al.* (2012) elucidam tal afirmação e a relacionam com a qualidade e atividade biológica induzida pela matéria orgânica depositada na superfície. Tais constatações elencam condições observadas em MN, o que explica os maiores conteúdos de Fe na área.

Os teores de Fe podem ser considerados bons e altos no SAF, com exceção da última camada (ALVAREZ *et al.*, 1999). No SAF, os valores podem ser consequência na variabilidade da sobreposição de resíduos orgânicos nas linhas de cultivo, pois esse sistema se destacou em relação a PA e CA, ao mesmo tempo em que apresentou valores inferiores a MN ($p < 0,05$). Esses valores também ajudam a compreender o bom estado de agregação observado no SAF, visto que essa condição é função de condições físicas e químicas, sendo uma delas a

presença de óxidos de ferro (SILVA; MIELNICZUK, 1998; DEMARCHI; PERUSI; PIROLI, 2011).

No Cerrado há forte presença de Fe nos solos intemperizados, como resultado do intemperismo de material de origem, como é o caso dos Latossolos (BARUQUI & MOTTA, 1983). Como os teores do elemento não se diferenciam ($p < 0,05$) entre os sistemas PA e CA, é válido dizer que o SPD não influenciou para aumento de Fe na área de cana-de-açúcar. Esse resultado reforça os dados elucidados por Silva Neto *et al.* (2008).

Analisando as quantidades de Zn, foram registrados os teores mais altos para a MN, seguida das áreas de SAF e CA. Entre SAF e CA só houve diferença estatística ($p < 0,05$) na segunda camada de análise, sendo o maior valor no SAF (Tabela 6). Os maiores valores de Zn na mata nativa se dão pelo constante depósito de resíduos orgânicos, o que é explicado pela intensa presença de substâncias orgânicas, que aumentam a solubilidade do elemento (BARBOSA FILHO; DYNIA; FAGERIA, 1994). No geral, para os quatro diferentes sistemas, os maiores valores de Zn foram registrados na profundidade até 0,10m, só não havendo variação significativa nos valores para as diferentes profundidades na pastagem.

4.3. Estoque de Carbono

Os valores obtidos para o COT e o EstC mostraram que a MN apresentou valores significativamente superiores as outras áreas, que variaram de 26,12 a 47,90 g kg⁻¹ e 44,39 a 139,16 Mg ha⁻¹, seguido pela SAF que variou entre 7,12 a 12,70 g kg⁻¹ e 18,80 a 48,67 Mg ha⁻¹, na profundidade de 0 a 0,40 m, respectivamente. No geral, houve tendência de diminuição no COT e aumento do EstC à medida que houve aumento de profundidade (Tabela 7).

Esses valores altos de COT podem ser justificados pelo elevado acúmulo de serrapilheira depositada na superfície do solo na MN, o que também vale para o SAF, ainda que com valores mais baixos (Tabela 7). A recorrente adição de resíduos orgânicos no solo em ambas as áreas ajuda ainda a explica o porquê de somente em MN e no SAF ter sido constatado diferenças significativas entre as camadas ($p < 0,05$), sendo que em ambas as áreas, os maiores valores registrados foram na camada até 0,10m, estatisticamente superiores às demais camadas.

Nos sistemas MN e SAF foi observado maior EstC na camada de profundidade entre 0,20 e 0,30 m, enquanto que em CA e PA os maiores valores foram obtidos na última profundidade (Tabela 7). Além do constante aporte de resíduos orgânicos em ambos os

sistemas, a maior concentração de raízes nas profundidades em questão explica os maiores valores de C estocado, sendo válidas também as áreas de cana-de-açúcar e pastagem, pelo longo tempo de desenvolvimento radicular das gramíneas.

Tabela 7 - Densidade do solo (Ds), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (EstC) nas diferentes profundidades, nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), Cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Prof.	COT	EstC
M	g kg ⁻¹	Mg ha ⁻¹
SAF		
0,00-0,10	12,70 aB	18,80 bB
0,10-0,20	9,42 bB	29,80 bB
0,20-0,30	10,20 bB	48,67 aB
0,30-0,40	7,12 bB	46,46 aB
CANA		
0,00-0,10	6,12 aC	11,98 bB
0,10-0,20	5,35 aC	19,91 bB
0,20-0,30	4,80 aC	24,95 aC
0,30-0,40	4,35 aB	32,00 aC
PA		
0,00-0,10	6,92 aC	10,83 bB
0,10-0,20	5,42 aC	17,76 bB
0,20-0,30	4,97 aC	23,69 aC
0,30-0,40	4,67 aB	29,71 aC
MN		
0,00-0,10	47,90 aA	44,49 cA
0,10-0,20	42,50 bA	86,40 bA
0,20-0,30	34,12 cA	139,16 aA
0,30-0,40	26,12 dA	80,35 bA
CV %	14,45	18,67

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna comparam profundidades e maiúsculas nas colunas os tratamentos nas mesmas profundidades, que não diferem entre si teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Fonte: elaborado pelo autor, 2024.

Foi evidenciado que dentre as áreas em que há uso do solo, o SAF foi o sistema que possui um maior estoque de C. Ainda que significativamente abaixo da mata nativa, sistema com o maior valor registrado, em apenas cinco anos de adoção do manejo de base agroecológica na área, a quantidade de C estocado aumentou em relação à pastagem, condição anterior da área antes do SAF (Tabela 7).

Isso é explicado através do recorrente aporte de material orgânico no SAF sobre as linhas de cultivo. Esses valores mais altos de C e MO em relação à outros sistemas de manejo, proporcionados pela incorporação de resíduos orgânicos em sistemas agroecológicos, também são evidenciados por diferentes autores como Loss *et al.* (2009a; 2009b; 2015), Froufe, Rachwal e Seoane (2011), Iwata *et al.* (2012) e Barbosa *et al.* (2020).

Esses resultados são semelhantes aos obtidos por Ribeiro *et al.* (2019), que mostraram que nos sistemas agroflorestais em que houve maior diversidade florística houve manutenção e até melhoria do estoque de carbono. Mesmo que não se trate de um agroflorestal, isso vale para os melhores resultados obtidos no sistema MN, área com maior diversidade florística.

No geral, esses dados reforçam que as zonas de vegetação nativa e ecossistemas em equilíbrio apresentam altos valores de estoque de carbono do solo, ao observar os valores em MN (Tabela 7). Atestam também as afirmações que pontuam o manejo agroecológico como estratégia eficiente para aumentar a quantidade de C no solo em curto prazo, pois o SAF apresenta maiores valores que CA e PA a partir de 0,20m de profundidade.

A partir disso, é possível dizer que neste estudo o manejo agroecológico supera o plantio direto sob a cultura da cana-de-açúcar e a pastagem. Essa capacidade do SAF de aumentar os teores de carbono significativamente em apenas cinco anos, corrobora os autores Nair *et al.* (2009) ao divulgarem o potencial desse tipo de sistema em sequestrar e acumular carbono no solo.

Entretanto, mesmo que o SAF tenha se demonstrado eficiente para aumentar o estoque de carbono em todas as profundidades em relação à condição inicial da área, esses valores foram significativamente menores em relação à área de vegetação nativa. Essa afirmação também é verificada por Iwata *et al.* (2012) ao registrarem baixo teor de C em relação à mata nativa.

4.4. Índice de Sensibilidade

Estabelecendo a área de MN como área padrão, observou-se que os índices de

agregação (DMG, DMP, IEA e AGRI) aumentaram consideravelmente na área em SAF e em menor proporção na área de PA, contudo diminuíram na área de Cana, o que mostra que o tráfego de máquinas pesadas para plantio, cultivo, colheita e transbordo proporcionam grandes prejuízos nos atributos do solo na área (Tabela 8).

O constante aporte de resíduos orgânicos, assim como a diversidade de espécies de cobertura no sistema de manejo em questão, fornece energia e condições favoráveis para os organismos que atuam na formação de agregados de boa qualidade. Essa justificativa também vale para explicar os maiores valores do IS calculados para COT e EstC no SAF (Tabela 8).

Tabela 8 - Índice de sensibilidade (Is) calculado para carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (EstC), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro sup superior a 2 mm (AGRI), nos sistemas de manejo agroflorestal (SAF), cana-de-açúcar (Cana), pastagem (PA) e mata nativa (MN), em Uberaba, MG, 2024.

Prof.	COT	EstC	DMG	DMP	IEA	AGRI
M						
SAF						
0,00-0,10	0,27	0,42	4,38	1,55	1,54	1,56
0,10-0,20	0,22	0,34	2,08	1,24	1,24	1,20
0,20-0,30	0,30	0,35	1,48	0,95	1,18	1,01
0,30-0,40	0,27	0,58	1,25	0,88	1,15	0,87
Cana						
0,00-0,10	0,13	0,27	0,99	0,60	1,18	0,59
0,10-0,20	0,13	0,23	0,47	0,44	0,91	0,35
0,20-0,30	0,14	0,18	0,47	0,35	0,97	0,27
0,30-0,40	0,17	0,40	0,47	0,39	0,98	0,29
PA						
0,00-0,10	0,14	0,24	2,91	1,38	1,39	2,91
0,10-0,20	0,13	0,21	1,61	1,16	1,15	1,61
0,20-0,30	0,15	0,17	1,42	1,03	1,11	1,42
0,30-0,40	0,18	0,37	1,26	1,01	1,09	1,26

Fonte: elaborada pelo autor, 2024.

Ao utilizarem da metodologia para cálculo Is em função da variável DMP, os autores Bertol *et al.* (2004) constataram que o sistema de semeadura direta não resultou em decréscimo significativo quando comparado ao campo nativo. Isso não é atestado quando observamos o índice de sensibilidade calculado para a variável no sistema CA (Tabela 8), onde nitidamente demonstra uma degradação. O efeito negativo do cultivo da cana-de-açúcar anunciado pelos autores Fontana *et al.* (2010) também é atestado aqui, ao utilizarem da variável DMP no cálculo do Is.

Assim como registrado no SAF, os índices de sensibilidade para a pastagem demonstram que este sistema de manejo foi bastante eficiente em melhorar a qualidade dos agregados do solo. Os maiores valores foram calculados para a profundidade até 0,10m, semelhantes ao sistema agroflorestal (Tabela 8). Tal fato reforça a afirmação de que gramíneas são espécies atuantes e eficientes na agregação do solo devido ao seu sistema radicular fasciculado (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Tendo o SAF como enfoque, somente não foi observada melhoria no DMP para as duas últimas profundidades e do índice AGRI na última profundidade. Em questão de agregação, o SAF foi notavelmente eficiente em melhorar a condição do solo, principalmente nas duas primeiras profundidades.

No geral, a aplicação da metodologia e cálculo do índice de sensibilidade evidenciou que a maior degradação foi observada no sistema CA, comportamento este que é semelhante aos obtidos por Araújo, Goedert e Lacerda (2007), ao reportarem que áreas com maior intensidade de uso do solo induzem maior alteração na estrutura do solo.

5. CONCLUSÕES

Os diferentes usos e ocupação do solo alteram os atributos químicos, físicos e o estoque de carbono no solo de forma significativa, independente do tempo de utilização de cada uma delas, considerando a mata nativa como referência.

A área de mata nativa apresentou os maiores valores dos macronutrientes e micronutrientes avaliados, seguido pela área em sistema agroflorestal, depois pela cana e pastagem que apresentaram valores semelhantes entre si.

Para a maioria dos atributos físicos, os piores valores foram quase sempre encontrados na área cultivada com cana-de-açúcar, onde através da densidade do solo e resistência mecânica à penetração das raízes constatou-se que o solo apresentava com nível elevado de compactação.

Os maiores índices de agregação (índice de estabilidade dos agregados (IEA) e porcentagem de agregados com diâmetro superior a 2 mm (índice AGRI) foram observados na área em sistema agroflorestal, seguido pela pastagem, mata nativa e cana-de-açúcar.

O índice de sensibilidade (IS) mostra que todos os sistemas diminuíram mais de 60% o teor de carbono orgânico total (COT) e o estoque de carbono no solo (EstC), em relação à área de mata nativa.

Os maiores valores de estoque de carbono foram encontrados na mata nativa em todas as profundidades avaliadas, enquanto que nas áreas de cana, pastagem e sistema agroflorestal apresentaram valores iguais até 0,20 m de profundidade.

Sendo assim, no geral, o SAF com cinco anos foi capaz em melhorar a qualidade química do solo, assim como aumentar significativamente o EstC a partir de 0,20m de profundidade, em relação às áreas de pastagem e cana-de-açúcar, mas não em relação à mata nativa. Em questão de qualidade física, o SAF se demonstrou eficiente em melhorar a qualidade física do solo em relação a todas as outras áreas.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. F.; MACHADO, H. A.; MARTINS, F. P.; QUEIROZ, I. D. de S.; TEIXEIRA, W. G.; MIKHAEL, J. E. R.; BORGES, E. N. Correlação do tamanho e da distribuição dos agregados em latossolos amarelo da região do Triângulo Mineiro com diferentes ambientes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, MG, v. 30, n. 5, p. 1325–1334, 2014. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22146>. Acesso em: 9 jan. 2023.

ALTIERI, M. **Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável** 5.ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2004. 120 p. ISBN 85-7025-538-1. Disponível em: https://arca.furg.br/images/stories/producao/agroecologia_short_port.pdf. Acesso em 11 mai. 2022.

ALTIERI, M. **Agroecology: the scientific basis of alternative agriculture**. Boulder: Westview Press, 1987. 227 p.

ALTIERI, M.; NICHOLLS, C. I. O potencial agroecológico dos sistemas agroflorestais na América Latina. **Revista Agriculturas**, Rio de Janeiro, RJ, v. 8, n. 2, p. 31-34, 2011. Disponível em: <https://aspta.org.br/revista/v8-n2-as-arvores-na-agricultura/>. Acesso em: 20 out. 2022.

ALVAREZ, V. V. H.; NOVAIS, R. F. de.; BARROS, N. F. de.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P, T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (org.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. 5. ed. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. cap. 5, p. 25-32 . Disponível em: https://www.academia.edu/35345434/RECOMENDA%C3%87%C3%95ES_PARA_O_USO_DE_CORRETIVOS_E_FERTILIZANTES_EM_MINAS_GERAIS_5_a_APROXIMA%C3%87%C3%83O. Acesso em: 10 jun. 2024.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, J. W.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 31, n. 5. p. 1099-1108, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500025>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/cYKyyvFQzN3YBTCHqtDd6JFr/?lang=pt#>. Acesso em: 13 de jan. 2023.

ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337–345, mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/mff5y8xXY3tQ3cJHnL6KbXH/?lang=pt&format=html#>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ARMANDO, M. S. **Agrodiversidade: Ferramenta a Serviço de uma Agricultura Sustentável**, Série Documentos – Embrapa, 21 p. 2002. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/18436>. Acesso em: 17 out. 2022.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: Doran, J.W.; Jones, A.J., eds. **Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America**, p.123-141, 1996.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R. de.; MELLO, J. M. de.; SILVA, da A. M. Padrão espaço-temporal da umidade volumétrica do solo em uma bacia hidrográfica com predominância de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1801–1810, set. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500034>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/pyCLQ6ryMCp9XQMLK4W9DNR/?lang=pt>. Acesso em: 02 jun. 2024.

BARBOSA, T. da C. S.; COSTA, N. M. G da.; SANTOS, D. B. dos.; MACHADO, M. S.; MARQUES FILHO, F. Qualidade física do solo sob manejo agroecológico e convencional. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, PR, v.6, n. 7, p. 48899-48909, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-511>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/13581>. Acesso em: 18 fev. 2024.

BARBOSA FILHO, M. P.; DYNIA, J. F.; FAGERIA, N. K. **Zinco e ferro na cultura do arroz**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 71p. EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 49. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=201503&biblioteca=vazio&busca=201503&qFacets=201503&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 03 jun. 2024.

BARRETO, A. C.; LIMA, F. H. S.; FREIRE, M. B. G. dos S.; ARAÚJO, de Q. R.; FREIRE, F. J. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. **Revista Caatinga, Mossoró**, RN, v. 19, n. 4, p. 415-425, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/66>. Acesso em 20. Mai. 2024.

BARUQUI, F. M.; MOTTA, P. E. F. Interpretação de um trecho do mapa de solos do Triângulo Mineiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, MG, v. 9, n. 1, p. 45-63, 1983. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/327207>. Acesso em: 25 nov. 2022.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil Till. Res.**, v. 86, n. 2, p.237-245, 2006. DOI: 10.1016/j.still.2005.02.023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223205541_Carbon_sequestration_in_two_Brazilian_Cerrado_soils_under_no-till. Acesso em: 01 jun. 2024.

BAYER, C.; MIELNICKZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Metrópole, ed. 2, p. 7-18, 2008.

BECK, H. E.; ZIMMERMANN, N. E.; MCVICAR, T. R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E.F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, v.1, P. 1-12, 2018.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; ROQUE, C. G.. Relação entre alguns atributos físicos e a produção de grãos de soja e arroz de sequeiro em Latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 365–371, mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200005> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/Dy4JhhXTphsVMZZMGY3pvNr/?lang=pt>. Acesso em: 20 mai. 2024.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob prepare convencional e semeadura direta em rotação e

sucessão de culturas comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155–163, jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000100015> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/vLt59ZdvF9sqCBFxStKtFcf/?lang=pt>. Acesso em: 11 mai. 2024.

BOLINDER, M.A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R. The response of soil quality indicators to conservation manage. **Canadian Journal Soil Science**, v.79, p.37-45, 1999.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. PortoAlegre: Bookman, 2013. 704p. Disponível em: https://www.academia.edu/34687817/Elementos_da_Natureza_e_Propriedades_dos_Solos_Livro_por_Ray_R_Weil. Acesso em: 20 jul. 2024.

CAMPANHA, M. M.; SANTOS, R. H. S.; FREITAS, G. B.; MARTINEZ, H. E. P.; JARAMILLO-BOTERO, C.; GARCIA, S. L. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na Zona da Mata MG. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 805–812, set. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000500004> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/ws9yBFcDFX4ZKs9CzyJ5fmr/?lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2024.

CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. **Agroecologia: alguns conceitos e princípios**. 1. ed. Brasília DF: MDA/DATER/IICA, 2004. v. 1, 24 p. ISBN: 978-85-60548-66-8. Disponível em: <http://frcaporal.blogspot.com/p/livros.html>. Acesso em: 27 abr. 2022.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. DE S.; COSTA, da L. M. Comportamento físico-hídrico de um podzólico vermelho-amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 257–265, fev. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/BX5PqFz9TYXMctXsMq4jj9v/?lang=pt>. Acesso em: 21 mai. 2024.

CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da Qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira [online].**, [S. l.], v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015> . Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/NspzjcHkkZfRVfnjmV6dprj/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 19 set. 2022.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 3, p. 527-538, 1998. DOI:10.1590/S0100-06831998000300019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285351010_Estabilidade_dos_agregados_e_sua_relacao_com_o_teor_de_carbono_organico_num_Latossolo_Roxo_distrofico_em_funcao_de_sistemas_de_plantio_rotacoes_de_culturas_e_metodos_de_preparo_das_amostras. Acesso em: 23 mar. 2024.

CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; SIQUEIRA NETO, M.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. E.; SCOPEL, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific reports**, v.6, p.21450, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep21450>.

COSTA, F. de S.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, jan. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100030>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/yQBNjzjkXVPFXQ4JFYMxQkr/?lang=pt>. Acesso em 12 jun.2023.

COUTINHO, F. S.; LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; RODRIGUES JÚNIOR, D. J.; TORRES, J. L. R. Estabilidade de agregados e distribuição do carbono em Latossolo sob sistema plantio direto em Uberaba, Minas Gerais. **Comunicata Scientiae**, v. 1, p. 100-105, 2010. Disponível em: <http://www.ia.ufrj.br/lgs/producao/gevasio/2010/10%20Coutinho%202010.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 56–63, jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/yMgLDHQLcmWDBnjG4D8Vkgf/?lang=pt>. Acesso em: 29 abr. 2024.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C.; BOLONHEZI, D.. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1929–1938, nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000600027>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/wPnG7xSfTp9KsSPBjNnDh8L/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 17 nov. 2024.

DEMARCHI, J. C.; PERUSI, M. C.; PIROLI, E. D. Análise da estabilidade de agregados de solos da microbacia do Ribeirão São Domingos, Santa Cruz do Rio Pardo - SP, sob diferentes tipos de uso e ocupação. **Rev Bras Tecnol Aplic Ci Agric.**, v.4, p.7-29, 2011. DOI: 10.5777/PAeT.V4.N2.01 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276186153_Analise_da_estabilidade_de_agregados_de_solos_da_microbacia_do_Ribeirao_Sao_Domingos_Santa_Cruz_do_Rio_Pardo_-_SP_sob_diferentes_tipos_de_uso_e_ocupacao. Acesso em: 20 jan. 2024.

DENARDIN, J. E.; KOCCHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. A.; WIETHOLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 15 p. ISSN: 1518-6512. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/969148/diretrizes-do-sistema-plantio-direto-no-contexto-da-agricultura-conservacionista>. Acesso em 23 nov. 2022.

DUARTE JÚNIOR, J. B.; COELHO, F. C.. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 576–583, nov. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000600003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/zcMfWQrsL5VdkJ9fR4P7WVg/#>. Acesso em: 25 nov. 2023.

DUTRA, R. M. S.; SOUZA, M. M. O. de. Brazilian Savanna, green revolution and the evolution of pesticides consumption. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 29, n. 3, p. 469–484, 2018. DOI: 10.14393/SN-v29n3-2017-8. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/sociedadennatureza/article/view/36367>. Acesso em: 6 jan. 2023.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos – Levantamento de reconhecimento de meia

intensidade dos solos e avaliação da aptidão agrícola das terras do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro, 1982, 562p.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 3, p. 390–395, set. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/CjnXzgSYGkWSYxSh7LrVXPh/?lang=pt>. Acesso em: 24 mar. 2024.

FERREIRA, E. V. DE O.; ANGHINONI, I.; ANDRIGHETTI, M. H.; MARTINS, A. P.; CARVALHO, P. C. DE F. Ciclagem e balanço de potássio e produtividade de soja na integração lavoura-pecuária sob semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 161–169, jan. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/FwRQ5CtqY3GkDKJPJxyyM9S/?lang=pt>. Acesso em: 25 mai. 2024.

FERREIRA, F. P., AZEVEDO, A.C., DALMOLIN, R.S.D., GIRELLI, D. Carbono orgânico, óxidos de ferro e distribuição de agregados em dois solos derivados de basalto no Rio Grande do Sul–Brasil. **Ciência Rural**, v.37, p.381-388, 2007. . DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000200013>

FERNANDES, F. A. FERNANDES, A. H. B. M. **Atualização dos métodos de cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá, MT: Embrapa Pantanal, 2013. 5p. ISSN:1981-7231. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/981613>. Acesso em: 15 jul. 2023.

FIGUEIREDO, L. H. A.; DIAS JUNIOR, M. S.; FERREIRA, M. M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:487-493, 2000.

FONTANA, A.; BRITO, de R. J.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A. Índices de agregação e a relação com substâncias húmicas em Latossolos e Argissolos de tabuleiros costeiros, Campo dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 3, p. 291-297, 2010. DOI: 10.5039/agraria.v5i3a461 Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v5i3a461>. Acesso em: 14 mai. 2024.

FROUFE, L. C. M.; RACHWAL, M. F. G.; SEOANE, C. E. S. Potencial de sistemas agroflorestais multiestrata para sequestro de carbono de áreas de ocorrência de Floresta Atlântica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 66, p. 143-154, 2011. DOI: 10.4336/2011.pfb.31.66.143. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/37198/1/pfb143-154.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas do Brasil (2020 – 2024). Brasília, DF. 2024. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 22 mai. 2024.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil-Water Conservancy*. v. 55, p.69-79. 2000.

IWATA, B. de F.; LEITE, L. F. C.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; GEHRING, C.; CAMPOS, L. P. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia**

Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 7, p. 730–738, jul. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/896JCprfHvQjNy5cmMg7jmJ/?lang=pt>. Acesso em: 02 mai. 2024.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia**. 1.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, p. 262, 1979.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: Black, C.A. (ed.) **Methods of Soils Analysis**. American Society of Agronomy, v, 39, p. 499- 510, 1965.

KLUG, I.; MAFRA, A. L.; FRIEDERICHS, A.; RECH, C.; FERT NETO, J. Atributos químicos do solo em plantios florestais em substituição à vegetação nativa em campos de altitude. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 279–290, 2020. DOI: 10.5902/1980509818905. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/18905>. Acesso em: 27 nov. 2022.

LAGO, W. N. M.; LACERDA, M. P. C.; NEUMANN, M. R. B. Indicadores de qualidade dos solos na microbacia do Ribeirão Extrema, DF: Parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 16, n. 7, p. 721-729, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700004>. Disponível em: <https://www.agriambi.com.br/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; SILVA, J. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado em plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**. v.44, p.16-23, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100003>.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; ANJOS, dos L. H.; SILVA, E. R. da. Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 1, p. 68–75, jan. 2009a. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000100010>. Acesso em: 20 mai. 2024.

LOSS, A. PEREIRA, M. G.; SCHULTZ, N.; FERREIRA, E. P.; DA SILVA, E. M. R.; BEUTLER, S. J. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 31, n. 3, p. 523–528, jul. 2009b. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v31i3.322>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/322>. Acesso em: 20 jan. 2024.

LOSS, A.; ANGELINI, G. A. R.; PEREIRA, A. C. C.; LÃ, O. R.; MAGALHÃES, M. O. L.; DA SILVA, E. M. R.; SAGGIN JUNIOR, O. J. Atributos químicos do solo e ocorrência de fungos micorrízicos sob áreas de pastagem e sistema agroflorestal, **Acta Agronomica**, Palmira v. 58, n. 2, p. 91-85, mar. 2009c. Disponível em: https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/10429/10899. Acesso em: 20. jul. 2023.

LOSS, A.; BASSO, A.; OLIVEIRA, B. S.; KOUCHER, L. P.; OLIVEIRA, R. A.; KURTZ, C.; LOVATO, P. E.; CURMI, P.; BRUNETTO, G.; COMIN, J. J. Carbono orgânico total e agregação do solo em Sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212–1224, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140718>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/sPQvjG8jFjgvjcJJXpxRkkG/?lang=pt>. Acesso em: 15. jul. 2023.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. spe, p. 133–146, jul. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009001300015>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbz/a/HYZzbRJWpgMbZBhDQ7LqcTj/abstract/?lang=pt#>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MARIN, A. M. P. **Impactos de um sistema agroflorestal com café na qualidade do solo**. 2002. 83 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2002.

MARTIN, A R.; ISAAC, M. E. Functional Traits in Agroecology: Advancing Description and Prediction in Agroecosystems. **The Journal of Applied Ecology**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 5-11. 2018. DOI: 10.1111/1365-2664.13039. Disponível em: <https://besjournals-onlinelibrary-wiley.ez33.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1111/1365-2664.13039>. Acesso em 23 jan. 2023.

MATTIELLO, E. M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R., BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; BEHLING, M. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1281–1290, set. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500021>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/FH5VpW3pxnkpcYCG8Vj9jxt/?lang=pt>. Acesso em: 25 mar. 2024.

McPHEE, J. E.; AIRD, P. L.; HARDIE, M. A.; CORKREY, S. R. The effect of controlled traffic on soil physical properties and tillage requirements for vegetable production. *Soil and Tillage Research*, v. 149, p. 33-45, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198714002992?via%3Dihub>. Acesso em: 23 jun. 2024.

MELO, G. B.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A.; GUARESCHI, R. F.; SOARES, P. F. C. Estoques e frações da matéria orgânica do solo sob os sistemas plantio direto e convencional de repolho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1511–1519, set. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900050>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/mwNbfd5dGqxQv3bkZG7jccx/?lang=pt>. Acesso em: 13 jul. 2023.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; DAVID, G. de.; DALLA SANTA, C. Qualidade física de solos irrigados no Rio Grande do Sul. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1308-1315, set. 2007.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHIN, J. C.; SILVA, V. R. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. In: TIECHER, T. (Org.). *Práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água*. Porto alegre: UFRGS, 34-49, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309285857_BENEFICIOS_DAS_PLANTAS_DE_COBERTURA_SOBRE_AS_PROPRIEDADES_FISICAS_DO_SOLO. Acesso em 24 jun. 2024.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S. l.], v. 172, n. 1, p. 10-23. 2009. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jpln.200800030>. Acesso em: 24 nov. 2022.

NASCENTE, A. S.; LI, Y.; CRUSCIOL, C. A. C.. Soil aggregation, organic carbon concentration, and soil bulk density as affected by cover crop species in a no-tillage System.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 3, p. 871–879, maio 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20140388>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/Z5CB4Bq6TBs4Gfrqkp6L3FC/?lang=en#>. Acesso em: 20 jun. 2024.

NICCHIO, B. **Fontes de fósforo e enxofre para cana-de-açúcar**. 165 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/23286>. Acesso em: 14 jul. 2024.

OLIVEIRA JUNIOR, J. A. D.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de Cerrado do Triângulo Mineiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 8, p. 1629–1636, ago. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/mjBbWZ8W8zbyqtj6b8nrWsN/?lang=pt>. Acesso em: 25 mar. 2024.

PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BEUTLER, S. J.; TORRES, J. L. R.; Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 508–514, maio 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000500010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/JQbggD9fpLPBzjN6tMQ6hNk/?lang=pt>. Acesso em: 17 mai. 2024.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *R Ci Agron.* 2013;56:40-7.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 285p. 2001.

RAMOS, F. T.; MONARI, Y. C.; NUNES, M. C. M.; CAMPOS, D. T. S.; RAMOS, D. T. Indicadores de qualidade em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagem extensiva no pantanal matogrossense. **Caatinga**, v. 23, p.112-120, 2010.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C.. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805–1816, set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/5WjW8tsqwwWS6xRyMftbvJM/?lang=pt>. Acesso em: 26 mai. 2024.

RIBEIRO, J. M.; FRAZÃO, L. A.; CARDOSO, P. H. S.; OLIVEIRA, A. L. G.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Fertilidade do solo e estoques de carbono e nitrogênio sob sistemas agroflorestais no Cerrado Mineiro. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, p. 913–923, abr. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509825310>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/25310>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ROSA, M. E. C.; OLSZEWSKI, N.; MENDONÇA, E. S.; COSTA, L. M.; CORREIA, J. R. Formas de carbono e m Latossolo Vermelho Eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 911–923, set. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500016>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcS/a/XZ7zjKWVZhWG3RvskGmjBbt/?lang=pt>. Acesso em: 18 mar. 2024.

ROSSETTI, K. de V.; CENTURION, J. F. Sistemas de manejo e atributos físico-hídricos de

um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.5, p.472-479, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000500002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/WmVQ6Q3KscRnyXhGTf4BhMn/?lang=pt#>. Acesso em: 18 jun. 2024.

SANTOS, D. R. dos.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 2, p. 576–586, mar. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/CGKVc6BnjKqMGzf38RmCpDb/?lang=pt>. Disponível em: 18. Mar. 2024.

SANTOS, F. S.; ZANÃO JUNIOR, L. A.; SECCO, D.; DIAS, P. P.; TOMASSONI, F.; PEREIRA, N. A utilização de plantas de cobertura na recuperação de solos compactados. **Acta Iguazu**. v.3, p.82-91, 2014.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

SANTOS, M. A. N.; PANACHUKI, E.; ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Infiltração de água em na Ultisol após cultivo de feijoeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.1612-1620, 2014.

SENE, M.; VEPRASKAS, M.J.; NADERMAN, G.C.; DENTON, H.P. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. **Society Soil Science Society of America Journal**, v.49, n.2, p.422-427, 1985.

SILVA, C. A. R. da.; LIMA, R. W. S. de; DIAS, D. dos S.; SANTOS, É. M. da C.; GOMES, D. L.; LIRA, E. dos S.; ARAUJO, K. D. Acúmulo de serapilheira e organismos edáficos em uma unidade de conservação, em Maceió, Alagoas. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 42, p. e190962, 2023. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.190962. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/190962..> Acesso em: 13 jun. 2024.

SILVA, da F. de F.; FREDDI, O. da S.; CENTURION, J. F.; ARATANI, R. C.; ANDRIOLI, F. F.; ANDRIOLI, I. Propriedades físicas de um Latossolo vermelho cultivado no sistema de plantio direto. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 12, p.191-204, abr. 2008. DOI: Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/289863395_Physical_properties_of_an_oxisol_unde_r_no-tillage_system. Acesso em: 29 mai. 2024.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J.. Sistemas de cultivo e características do solo afetando a estabilidade de agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 2, p. 311–317, abr. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000200017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/7zRHjHXzMQT4TnfXCVn3ckD/?lang=pt>. Acesso em: 26 mar. 2024.

SILVA NETO, L. F.; INDA, A. V.; BAYER, C.; DICK, D. P.; TONIN, A. T. Óxidos de ferro em latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1873–1881, set. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Pcs9K44n8BdxD7PJ4fzKSrp/?lang=pt>. Acesso em: 26 mar.

2024.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A.. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 253–260, abr. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200001> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/fxjJtVbZFwK7Tjv8jFM4VDF/?lang=pt>. Acesso em: 26 mai. 2024.

SILVA, G.J.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C.; MAIA, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-amarelo do cerrado Mato-grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.2135-2143, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500034>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/6CpdvpVCyNLjTsr7yg3gMNM/?format=pdf&lang=pt>.

SILVEIRA P. M.; SILVA J. H.; LOBO JUNIOR M.; CUNHA P. C. R. Atributos do solo e produtividade do milho e do feijoeiro irrigado sob sistema integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1170-11755, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/wRPJB7gXHy7ft99z3JLVL7g/>. Acesso em: 26 jun. 2024.

SKORUPA, A. L. A.; GUILHERME, L. R. G.; CURTI, N.; CASTRO SILVA, C. P. de.; SCOLFORO, J. R. S.; SÁ, J. J. G. de.; MARQUES, M. Propriedades de solos sob vegetação nativa em Minas Gerais: distribuição por fitofisionomia, hidrografia e variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 1, p. 11–22, jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/YfPgLv5ty94xzY86PZbQNR/?lang=pt>. Acesso em: 13 mai. 2024.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C.. Propriedades químicas de um latossolo vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 1, p. 133–139, jan. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000100014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/SbHQWLCrgGRNM5P6BRdFQ6s/#>. Acesso em: 11 jun. 2024.

SOUZA, H. A. de.; MARCELO, A. V.; CENTURION, J. F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, v. 43, n. 4, p. 658–663, out. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000400006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/BKwz6MwwQzLjDGxSf5Gnwwt/?format=html#>. Acesso em 19 jun. 2024.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, n.1, p.299-235, 1991.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; REINERT, D, J.; LIMA, de C, L, R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1159–1167, ago. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000800013>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/9nWsJjJkz3P69Mq7Sk4fgtn/?lang=pt>. Acesso em: 29 mai. 2024.

TAYLOR, S. A.; ASHCROFT, G. L. **Physical edaphology** - The physics of irrigated and nonirrigated soils. San Francisco, W.H. Freeman, 1972. 532p.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia, 188 p., Boletim técnico de solos n.º 5, 1985.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3.ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Embrapa, 2017, 573p.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33. p.141-163, 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>. Acesso em: 20 mai. 2024.

TORRES, J. L. R.; FABIAN, A. J.; PEREIRA, M. G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 437-445, maio 2011. DOI: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/nC4DBtV6cnih6D9jYKr93DCt/?lang=pt>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000300001>. Acesso em: 20 mai. 2024.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, L. R. de.; SOUZA, Z. M. de. Atributos físicos de um Latossolo vermelho cultivado com plantas de cobertura, em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 428-437, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140597>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/5vdth9tW6CPV7fWvYLBqqRp/?lang=pt>. Acesso em: 08 mai. 2024.

VASCONCELLOS, R. C.; BELTRÃO, N. E. S. Avaliação de prestação de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais através de indicadores ambientais. **Interações**, Campo Grande, MS, v. 19, n. 1, p. 209-220, jan./mar. 2018. DOI: 10.20435/inter.v19i1.1494 Disponível em: [hΣ p://dx.doi.org/10.20435/inter.v19i1.1494](https://dx.doi.org/10.20435/inter.v19i1.1494). Acesso em: 20 jan. 2023.

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600025> Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/4VpDdSLBTKCcbthRt5YkQxn/?lang=pt>. Acesso em: 24 jun. 2024.

VILELA, L.; MARCHÃO, R. L.; WRUCK, F. J.; OLIVEIRA, P.; PEDREIRA, B. C.; CORDEIRO, L. A. M. Práticas e manejo de sistemas de Integração Lavoura-Pecuária na safra e safrinha para as regiões Centro-Oeste e Sudeste. In: CORDEIRO, L. A. M.; VILELA, L.; KLUTHCOUSKI, J.; MARCHÃO, R. L. (Ed.). *Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. DF: Embrapa, 2015. p.103-119. (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas).

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** [online]. v. 33, n. 4, p. 743-755. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400001>. ISSN 1806-9657. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbc/a/rSb9bsbsgjBqw4t9b9jrDBC/?lang=pt>. Acesso em 07 de jan. 2023.

WASTOWSKI, A. D.; ROSA, G. M.; CHERUBIN, M. R.; RIGON, J. P. G. Caracterização dos níveis de elementos químicos em solo, submetido a diferentes sistemas de uso e manejo, utilizando espectrometria de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF). **Química Nova**, v. 33, n. 7, p. 1449-1452, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000700005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/Xmt7PnPqDjCkkFJ4xQxvqfb/?lang=pt>. Acesso em: 26 mar.

2023.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005000500010>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/KPr6NbDJfBsDvQ4BcLyyFWd/?lang=pt>. Acesso em: 13 de jul. 2023.

WEDLING, B.; JUCKSCH, I.; SÁ MENDONÇA; VINHAL-FREITAS, I. C. Mudanças no carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos da matéria orgânica sob sistema agrossilvipastoril. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 641-653, out. 2011. DOI: Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/i/2011.v21n4/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988.

ZHAN, S.; QIN, F.; QI, D.; WU, Z.; YANG, C.; ZHANG, Y.; FU, Q. Preliminary Study on the Effect of Different Ecological Cultivation Modes on the Water Stability of Soil Aggregates in Rubber Based Agroforestry Systems. **Open Journal of Ecology**, v. 13, p. 11, p. 782-793. DOI: 10.4236/oje.2023.1311048. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=129161>. Acesso em: 04 abr. 2024.